Mitt. Bayer. Staatssamml. Paläont. hist. Geol. 4 37—69 München, 31. Dez. 1964

Zur Entstehung der Solnhofener Plattenkalke (unteres Untertithon)

Von K. WERNER BARTHEL, München[1])

Mit 1 Abbildung und Tafeln 8—11

Zusammenfassung: Es werden eigentümliche Arten der Einbettung von Fossilien in den Solnhofener Plattenkalken behandelt. Eine eingemessene Platte mit zahlreichen Ammoniten-Rollmarken wird angeführt. Mit Experimenten wird versucht den Rollmechanismus von Ammoniten-Schalen zu klären. Die Ergebnisse veranlassen eine Überprüfung der geltenden Ansichten über die Entstehung der bayerischen Plattenkalke. Sedimente, Zeugnisse von Wasserbewegung und Art der Einbettung bei den verschiedenen Tiergruppen werden im Hinblick auf mögliche, rein subaquatische Entstehungsweise betrachtet. Die Erkenntnisse ermöglichen folgende Annahme: Klimatische und morphologische Umstände waren Ursache für hypersaline, zeitweise stagnierende Gewässer. Gelegentliche, lokale Trockenlegung hat stattgefunden. Fossilien wurden in sauerstoffarm- bis freiem, übersalzenem Wasser vor Verwesung weitgehend geschützt. Die Kalkausscheidung in diesem Milieu läßt sich nach neuen amerikanischen Ergebnissen in Westindien und in der Florida Bay unschwer erklären. Sehr ähnliche Bildungsbedingungen sind auch für den Raum der Plattenkalke wahrscheinlich zu machen. Die Entstehung der Plattenkalke unter Wasserbedeckung darf daher angenommen werden. Aus faunistischen Gründen wird die Dauer der Bildung auf etwa 250 000 Jahre veranschlagt.

Abstract: Some unusual types of burial of fossils in the Solnhofen lithographic limestones are described. A large slab of limestone, showing numerous ammonite roll marks was secured, with the direction of motion surveyed in situ at the quarry. This slab is given due attention. Rolling of ammonite shells is tested by experiments. Results gained from investigations on the material mentioned led to reconsideration of present views on the origin of the Bavarian litho-

[1]) Konservator Dr. K. WERNER BARTHEL, Bayer. Staatssammlung für Paläontologie und histor. Geologie, 8 München 2, Richard-Wagner-Str. 10.

graphic limestones. Traces of currents, sediment, and way of burial in different systematic groups of fossils are tested for proving a possible subaquatic origin. Climatic and morphologic factors were responsible for an increase in salinity and temporal stagnation. Occasional and locally restricted receeding of the water can not be denied. Decay of dead animals was greatly decreased by strong salinity and by want of oxigen. Precipitation of calcium carbonate under marine- tropical conditions can be easily explained according to knowledge gained by U. S. scientists in the West Indies and Florida Bay. Closely similiar conditions can be assumed for the region in which the lithographic limestones of Bavaria originated. Their subaquatic deposition, using all the evidence, seems to be ascertained. Faunistic considerations demand a duration in the range of 250 000 years for sedimentation of the Solnhofen lithographic limestones.

Inhalt

Seite

Einleitung

Zahlreiche schöne Versteinerungen gelangen alljährlich aus den Abbaugebieten der Solnhofener Plattenkalke in die Bayerische Staatssammlung für Paläontologie und historische Geologie. Meist wird das Material von Bruchbesitzern oder Arbeitern erworben. Es ist bekannt, daß die Plattenkalke fossilarm sind. Nur dem regen Abbau verdanken wir reiches Material. Die Brucharbeiter schenken oftmals nur den Exemplaren Beachtung, die gewinnbringend erscheinen. Viele Stücke, die Aufschluß über Bildung von Marken, Einbettung und sonstige interessante Tatsachen geben könnten, wandern auf die Halden. So lohnt es sich, auch dem Abraum etwas Zeit zu widmen. In den letzten Jahren gelang es mir, einige der hier abgebildeten Versteinerungen zu bergen.

Eine große Platte mit Ammoniten-Rollmarken wurde in meinem Beisein von Arbeitern aus dem Schichtstoß entnommen. Die Richtung der Marken wurde eingemessen. Bereits früher erwarb ich aus dem gleichen Horizont eines benachbarten Bruches eine Platte. Sie entstammt einem Stapel abgehobenen Materials und ist daher nicht orientiert.

Das behandelte Material war auch der Anlaß, der Entstehung der Solnhofener Plattenkalke erneut einige Gedanken zu widmen.

Ich bedanke mich bei den Herren H. Bögel (Dipl.-Geol.), R. Fischer (Dipl.-Geol.), R. Förster (Dipl.-Geol), U. Franz (Dipl.-Geol.), Prof. Dr. H. Hagn, Dr. W. Jung, U. Pflaumann (Dipl.-Geol.), H. Rothmund (Dipl.-Ing.), Prof. Dr. P. Schmidt-Thomé, Dr. G. Tischer, H. Valentin (Dipl.-Ing.), Dr. P. Wellnhofer aus München und Doz. Dr. B. Ziegler aus Zürich. Ihre Unterstützung durch Literatur, spezielle Auskünfte, Hinweise, Diskussion und Kritik war mir sehr wertvoll.

A. Neufunde als Hinweise zur Entstehung

1. Durch Einbettung

a. bei Belemniten

Unter den Tierresten, die uns aus den Solnhofener Plattenkalken überliefert sind, finden sich spärlich Rostren von Belemniten. Üblicherweise liegen sie parallel zur Schichtfläche im Sediment, verschiedentlich sogar noch in Zusammenhang mit dem Phragmokon.

In den letzten Jahren kamen mir jedoch Stücke zur Hand, die fast senkrecht im Gestein stecken oder erkennen lassen, daß sie schräg auf dem ehemaligen Meeresgrund auftrafen. Aldinger (1930, S. 265) und Fahrion (1937, S. 64) führen diese Einbettungsweise von Nusplingen als häufig an.

Die beobachteten Exemplare gehören durchwegs der Gattung *Hibolithes* an. Auf welche Art mag die verschiedenartige Einbettung von gleichartigen Hartteilen einer Gattung zustandegekommen sein? Die Lösung liegt im Vergleich mit rezenten, treibenden Tintenfisch-Leichen. Die Tentakeln hängen dabei nach unten. Bei fortgeschrittener Verwesung wird beim Belemnitentier auch das schwere Rostrum diese Tendenz zeigen. Weitere Verwesung führt zum Abreißen des Rostrums. Das Rostrum steht oft noch in Verbindung mit dem luftgefüllten Phragmokon und wird so am schnellen Absinken gehindert.

Um den Vorgang näher kennen zu lernen, wurden einige Experimente angestellt. Ich benutzte dazu ein verkieseltes, freigeätztes Rostrum von *Hibolithes* mit etwa 5 cm Länge. Der Phragmokon wurde durch einen luftgefüllten, wachsgetränkten Papierkegel dargestellt und konnte in der Alveole des Rostrums befestigt werden. Die Sinkversuche wurden einmal mit 15 cm zum anderen mit 40 cm Wassertiefe ausgeführt. Ferner wurde das Verhalten in Strömung beobachtet.

Ohne Phragmokon geht das Rostrum sehr schnell auf Grund und dringt je nach Fallwinkel wenig oder sehr tief ins Sediment ein. Das Sediment wurde im Experiment durch eine 4 cm dicke Schlammschicht (entsprechend etwa dem Wattenschlick) dargestellt. Je steiler das Rostrum einfällt, um so stärker dringt es ein. Aus horizontaler Stellung fallend behielt unser *Hibolithes* die Lage bei, doch scheinen Belemniten in dieser Weise in den Plattenkalken nicht zur Ablagerung gekommen sein.

Bei luftgefülltem Phragmokon war das Absinken gebremst. Das Rostrum konnte kaum in Schlamm eindringen. Mit dem Phragmokon als Boje bleibt es senkrecht im Wasser stehen und macht leichte Wasserbewegungen mit. Füllt sich der Phragmokon allmählich mit Wasser, genügt die geringste Bewegung, um das Umkippen zu veranlassen. Fossil tritt dies dann in Stücken, wie auf Taf. 8 Fig. 2 vor Augen.

Ist der Phragmokon beschädigt, füllt er sich ganz oder teilweise mit Wasser; im Experiment wurde dazu der „Phragmokon" oben geöffnet. Als Folge verringert sich zwar auch die Sinkgeschwindigkeit, doch vermag das Rostrum ziemlich tief in den Grund einzudringen. Liegt erhebliche Schräglage vor, bohrt sich die Spitze in den Boden, wird durch Umkippen aber wieder aus dem Sediment herausgehoben, ohne daß wesentliche Spuren von diesem Geschehnis sichtbar bleiben. Rostrum und Phragmokon kommen horizontal auf der Schichtfläche zu liegen. Dieser Modus der Einbettung wird durch Fig. 3—5 auf Taf. 8 dargestellt.

Strömung hat, soweit feststellbar, keinen besonderen Einfluß auf die Einbettung.

Zu beachten ist das Verhältnis Rostrum—Phragmokon im Verlauf der Ontogenie. „*Belemnites acicula*" MÜNSTER dürfte wohl das älteste bekannte ontogenetische Stadium von *Hibolithes semisulcatus* oder einer verwandten Art sein. Das Rostrum der Jugendform ist nicht viel stärker als eine Stecknadel und etwa ebenso lang. Der Phragmokon hat dagegen doppelte Länge und ein Vielfaches der Breite. Das System Rostrum—Phragmokon war somit schwimmfähig. Einen mittelbaren Beweis liefern die MÜNSTER'schen Originale zu „*Belemnites acicula*" mit ihrem Bewuchs von Muschellarven und kleinen Muscheln am Phragmokon. Die Gewichtszunahme der heranwachsenden Muscheln brachte das System zum niedersinken. Muscheln fehlen, wenn „*Belemnites acicula*" in Koprolithen auftritt.

Bei späteren Wachstumsstadien verschiebt sich das Längenverhältnis zugunsten des Rostrums. Beim Typus zu *Hibolithes semisulcatus*, der mir vorliegt und ebenfalls den Plattenkalken entstammt, ist das Rostrum länger als der Phragmokon.

Ein vollständiges Belemniten-Tier aus den bayerischen Plattenkalken wäre ein willkommener Fund. Wir kennen jedoch bisher nur die Rostren, oftmals noch im Verband mit dem Phragmokon. Auf dieses Faktum verwies NAEF 1922 (S. 180 u. f., S. 249 u. f.). NAEF bringt *Acanthoteuthis speciosa* (MÜNSTER) in Zusammenhang mit den Resten von *Hibolithes semisulcatus* (MÜNSTER). Diese

Meinung NAEF's besteht sicher zu recht und deckt sich mit unserer Vorstellung: wie hinter dem Schädel bei Wirbeltieren, bestand auch bei diesen Tintenfischen im Bereich Phragmokon—Proostracum eine Stelle, die für Verwesung besonders anfällig war. Die schweren, leicht abreißenden Rostren kamen demzufolge früher zur Ablagerung als der *Acanthoteuthis*-Körper. Durch Verwesungsgase aufgetrieben blieb dieser noch in Schwebe.

Die geschilderte Art der Einbettung setzt eine Bedingung voraus: sie kann nur unter Wasser vor sich gegangen sein. Einbettung der Belemniten durch eine Flutwelle, welche beim Rückzug die Tiere auf dem flachen Strand hinterließ, erscheint schwer erklärbar.

Taf. 8 Fig. 2 zeigt ein kleines Rostrum mit Phragmokon, dessen Einbettungsweise auf S. 40 kurz angeführt wurde. Der vom Rostrum des umkippenden Belemniten aufgeworfene kleine Hügel verbarg ursprünglich die Spitze. In schrägem Licht, rechts neben dem Rostrum ist er zu erkennen; bei der Freilegung wurde er etwas abgetragen.

Ziemlich schräg und wohl auch mit wassergefülltem Phragmokon kam der auf Taf. 8, Fig. 3, 4 abgebildete Belemnit im Sediment zu liegen. Durch die Sedimentsetzung wurde die Stellung später sicher verstärkt, obwohl bemerkt werden muß, daß auch bei den Versuchen solche Positionen zustande kamen. Dieser Fund wurde herangezogen, da er vermittelnd zwischen dem vorigen und dem nächsten steht. Er stammt nicht aus den Solnhofener Plattenkalken. Die Fazies, dünnschichtig-plattig, unregelmäßig, ist ihnen jedoch ähnlich. Eingeschwemmter Laterit bewirkte die rote Farbe. Durch die Beimengung von Riff-Feinschutt erscheint das Korn gröber. Es handelt sich um eine sog. Rote Lage, die in unserem Fall in den obersten Bereichen des Mittleren Malm liegt. Der Altersunterschied gegenüber den eigentlichen Plattenkalken ist gering, die Bildungsumstände kaum verschieden.

Nahezu senkrecht steckend fand ich einen Belemniten in den oberen Schiefern NNE Haunsfeld bei Dollnstein. Er ist das Original zu Taf. 8, Fig. 5. Die Wucht des Auftreffens war groß genug, das Rostrum solange senkrecht zu erhalten, bis es völlig einsedimentiert war. Zur Untersuchung wurde der Belemnit viertelseitig freigelegt. Das Anpolieren der angrenzenden Gesteinsflächen zeigte die Schichtveränderungen, die durch das Auftreffen des Rostrums hervorgerufen wurden. Die etwas über 5 cm dicke Platte erwies sich in ihrem oberen, größeren Teil als sehr einheitlich. Ein Bruch durchzieht diesen Abschnitt. Interessant sind aber ohne Zweifel die unteren 1,5 cm. Wir sehen von oben nach unten: 5 mm helle unregelmäßige Fäule, 1—1,5 mm Kalk, etwa 1 mm Fäule mit unruhiger Oberfläche und, bis zur Unterseite der Platte, der noch Fäulenreste anhaften, wieder 8 mm Kalk. Im Querschnitt fallen innerhalb der Fäulen zahlreiche dunkle Pünktchen auf; bei näherer Betrachtung erweisen sie sich als umkristallisierte Radiolarien. Diese Schichten aus dem unteren Plattendrittel wurden vom Belemniten durchbohrt. Inwieweit Liegendfäule und eventuell auch Liegendplatte in Mitleidenschaft gezogen wurden, entzieht sich unserer Kontrolle. Nach Rekon-

struktion der fehlenden Rostrum-Spitze dürfte es sich um 1—1,5 cm handeln. Die Schichtverformung wird durch die Fäulen, die entlang des Rostrums abwärts geschleppt sind, deutlich. Das Eindringen des Belemniten in den Grund erfolgte nach Ablagerung der 5 mm-Fäule, denn der „Einschlagstrichter" wurde von der folgenden Schicht ausgeglichen. Mehr als die Hälfte des Rostrums ragte über den Meeresboden empor. Es wurde allmählich völlig eingebettet ohne seine Stellung zu verändern. Wir schließen daraus auf einigermaßen ruhige Wasserverhältnisse während dieses Zeitraumes.

A. 1. b. bei *Glochiceras*

Die Mehrzahl der Ammonitengehäuse nimmt in den Solnhofener Plattenkalken die stabilste Lage ein. Sie liegen mit ihrer scheibenförmigen Seite parallel zur Schichtfläche.

Weniger häufig werden jedoch Reste von Ammonitengehäusen gefunden, die ehemals senkrecht im Schlamm stecken blieben. Unter diesen ist die Gattung *Aspidoceras* am zahlreichsten vertreten. *Aspidoceras* ist für diese Art der Einbettung wegen der aufgeblähten Form mit den seitlich abstehenden Knoten besonders geeignet. Erhalten bleibt immer nur die unterste, im Schlamm steckengebliebene Partie. Stücke, wie sie ROTHPLETZ (1909, Taf. 1, Fig. 8, 9) abbildete befinden sich in der Münchner Sammlung. Seltener als *Aspidoceras* trifft man die verwandte Gattung *Hybonoticeras* durch diese Art der Einbettung überliefert. Das läßt sich auf die schlanke Gehäusegestalt zurückführen; nur selten genügten die Flankendornen, das Gehäuse am Umkippen zu hindern. Nicht zu vergessen ist aber auch, daß *Hybonoticeras* nur eine geringe Rolle im Faunenbild spielt.

Auch die Perisphinctiden haben Zeugnisse senkrechter Einbettung hinterlassen. Davon hat ROTHPLETZ (1909, Taf. 2, Fig. 1, 2) Abbildungen gebracht. Offenbar waren es hier ebenfalls Formen mit breitem Rücken, die bevorzugt überliefert wurden.

Schlanke Gattungen wie *Neochetoceras*, *Taramelliceras*, waren unter dem Material mit senkrechter Einbettung, das mir bisher zu Händen kam, nicht vertreten. Vor kurzer Zeit konnte ich jedoch im Haldenmaterial eines Bruches NNE Haunsfeld bei Dollnstein ein *Glochiceras* in dieser Position finden.

Obwohl die Erhaltung des Fundstückes nicht ideal ist, kann festgestellt werden, daß es der Art *lithographicum* (OPPEL) angehört. Das Gehäuse geriet in Schwimmstellung auf Grund und deformierte die oberflächennahen Lagen des Sediments (unter B, Taf. 9, Fig. 1). Beide Aptychen nehmen die sog. „Normalstellung" im Externteil des vorderen Wohnkammerabschnittes ein. Es ist anzunehmen, daß das Gehäuse nach dem Aufsetzen noch längere Zeit intakt blieb. Vergleichen wir nämlich B und B' (Taf. 9, Fig. 1), dann entspricht den oberen Lagen von B außerhalb der Ammonitenschale nur eine unregelmäßige Fäule B' innerhalb der Schale. Unter B' kam es zu einiger Kalkausscheidung. Das bedeutet, daß die lagige Abscheidung innerhalb des Gehäuses nicht möglich war.

Während der Bildung des Kalkes zwischen A und B muß aber die Schale zerbrochen sein, denn wir treffen bei C Reste einer inneren Windung an: ein Bruchstück der Externseite mit Sipho. Schließlich brach kurz vor Bildung der Fäule A ein Stück Schale und kam parallel der Schichtung zu liegen. Dadurch verschob sich die „Stufe" zwischen A und A' weiter nach rechts (im Bild) als dies ursprünglich der Fall gewesen wäre.

Die Art der Einbettung ist nur unter ständiger Wasserbedeckung verständlich. Nur im Wasser kann die Schale in dieser Position auf den Grund kommen. Feinschichtung bei B muß im Wasser entstanden sein, da die dünnen Fäulen umkristallisierte Radiolarien enthalten, deren gleichmäßige Verteilung bei äolischer Ablagerung unwahrscheinlich erscheint. Auch die Füllung des Wohnkammer-Lumens hätte sich bei Füllung mit äolischem Material anders vollzogen und es wären Spuren davon geblieben.

A. 2. **Physikalische Veränderungen im Sediment: Rollmarken und Schlammsprünge auf den Paintner Platten**

a. Oberseiten

Rollmarken von Ammoniten-Gehäusen sind seit einiger Zeit bekannt. Erst SEILACHER gab 1963 ausführliche Beschreibungen und Deutungen. Seiner Arbeit ist zu entnehmen, daß die Richtung der Rollmarken und damit die der Strömung bisher niemals im Steinbruch eingemessen wurden. Ebenso sind zahlreiche parallele oder sich überkreuzende Rollmarken auf einer größeren Schichtfläche nicht veröffentlicht.

Durch einen glücklichen Zufall konnte ich im Rashofer-Bruch ca. 500 m N Painten bei Entnahme einer Platte mit vielen Ammoniten-Rollmarken zugegen sein. Dabei war es möglich, die Richtung der auf der Platte überlieferten Rollmarken einzumessen. Aus dem Bruch des Kalkwerkes Rygol, etwa 1 km nördlich von Painten, wurde eine weitere Platte erworben.

Beide Platten zeigen auf ihren Oberflächen Ammoniten-Rollmarken. Es lassen sich zwei Richtungen der Marken unterscheiden, die sich in einem Winkel von etwa 10° überschneiden. Da die Winkel kreuzender Marken etwa dieselben sind und der Verlauf der Rippelmarken an den Plattenunterseiten in einem ähnlichen Verhältnis zu diesen Winkeln steht, handelt es sich wohl trotz der Entfernung um dieselbe Schicht. Diese Schicht liegt nach unserer Ansicht 20—30 cm unter der Krummen-Lage V von STREIM (1961, S. 24, 25). Im Rygol-Bruch ist die markentragende Schicht etwas mächtiger.

Von den gezählten, in ihrer Richtung einigermaßen festzulegenden Sequenzen der Marken läßt sich sagen, daß sie nach etwa N 100° E eingeregelt sind. Niedriger ist ihre Frequenz gegen N 90° E. Die Rippelmarken der Unterseiten verlaufen ungefähr senkrecht dazu. Eingemessen wurde, wie erwähnt, nur die Rashofer-Platte. Auf ihr verhalten sich die Häufigkeiten von Haupt- zu Neben-

richtungen ungefähr 2:1. Die zeitliche Abfolge ist an Überlagerungen der Marken zu klären. Danach ist die Anlage der Hauptrichtung immer jünger als die der anderen. Auch innerhalb der bevorzugten Richtung ist in einigen Fällen durch Überlappen von Marken eine zeitliche Differenz zu belegen. Seltener ist dies bei der zweiten Richtung erkennbar. Weitaus die Mehrheit der Marken wurde durch Perisphincten-Gehäuse bzw. -Bruchstücke hervorgerufen. Die auffälligsten Eindrücke auf der Rashofer-Platte sind jedoch „Trudel"-Sequenzen einer *Aspidoceras*-Schale. Marken, die man auf Ammoniten wie *Glochiceras* beziehen kann, sind nicht nachzuweisen. Das Fehlen von Rollmarken dieser schmalrückigen, schlanken Gehäuse ist in ihrer Form begründet. Meines Wissens wurden solche Gehäuse bisher auch nicht im Zusammenhang mit Marken beobachtet.

Von Aptychen liegen ebenfalls Marken vor. Einmal ist dies der Abdruck eines Laevaptychen, der ursprünglich die Lage gewölbt oben einnahm. Zum anderen treffen wir zusammen mit der *Aspidoceras*-Marke lineare Doppeleindrücke. Die beiden „Linien" nähern sich, setzen gelegentlich kurz aus, entfernen sich dann wieder voneinander, ohne je eine gewisse Breite zu überschreiten. Sie scheinen in ursächlichem Zusammenhang mit der Sequenz der *Aspidoceras*-Marken zu stehen. Versuchsweise wurde ein Laevaptychus an einem Faden befestigt und mit unregelmäßigen Bewegungen über abbindenden Gipsbrei gezogen. Die entstandenen Eindrücke waren der Doppelmarke auf der Rashofer-Platte sehr ähnlich. Die Deutung als nachgezogenen Aptychus, der durch einen Ligament-Fetzen noch im Verband mit der *Aspidoceras*-Schale stand, liegt für diese Marke nahe. Das Trudeln des Gehäuses verursachte die Unregelmäßigkeit der Bewegung, welche sich auf den nachgeschleiften Aptychen übertug. Die Bewegung war aber offensichtlich so, daß der Aptych die Lage „gewölbt oben" nicht veränderte. Daß die paarigen Eindrücke nicht durch Bruchränder des Gehäuses verursacht wurden, ergibt sich aus der Stellung zu den Abdrücken, die das Gehäuse selbst hinterließ: teils weit außerhalb dieser Marken, teils mitten hindurchziehend. Soweit sich Gehäuse- und Aptychengröße nach den überlieferten Zeugnissen abschätzen lassen, korrespondieren sie.

Auch die Richtung aus der die Strömungen kamen ist zu ermitteln. Seilacher (1963, S. 599—605) konnte verschiedene Kriterien für die Bewegungsrichtung z. T. experimentell erarbeiten und schematisch abbilden. Seine Ergebnisse sind ohne Schwierigkeit auf unsere Marken zu übertagen. Wir sind somit in der Lage zu sagen, welche Richtung die Wasserbewegung nahm, da Marken-Sequenzen eingemessen werden konnten. So wurden *Aspidoceras* und Perisphinctiden, die hauptsächlich in N 100° E bewegt wurden etwa von Ost nach West verfrachtet. Eine frühere Strömung verlief genau von Ost nach West. Die Rippelmarken auf der Unterseite streichen nahezu N-S, daher muß die Wasserbewegung senkrecht dazu, E-W, angenommen werden.

Das Rippelmuster hat sich auf der Rashofer-Platte sogar noch auf die Oberseite durchgepaust. Bei der dickeren Schicht aus dem Rygol-Bruch ist dies nicht der Fall.

Die Formen der überlieferten Marken sind mannigfaltig. Neben den normalen Sequenzen (SEILACHER's Ausdruck, 1963, S. 598) die von rollenden Perisphinctiden-Gehäusen abgedrückt wurden, sind Torkel-Marken (SEILACHER 1963, S. 600) vorhanden. Auch Bruchstücke von Schalen, SEILACHER bezeichnet sie als Gehäuse-Ruinen, haben in der Schichtoberfläche ihre Marken hinterlassen. Daneben sieht man noch Eindrücke auf den beiden Paintener Platten, die Perisphincten-Gehäuse erzeugten, deren Breit-Seite senkrecht zur Strömung orientiert war (vgl. Taf. 8, Fig. 1).

Für die Bewegungsweise von Aspidoceraten-Schalen habe ich oben den Begriff „Trudeln" eingeführt. Er scheint mir für das unregelmäßige Rollen dieser kugeligen Formen zutreffender als Torkeln. Die Trudel-Sequenz eines *Aspidoceras* auf unserer Platte wurde bereits im Zusammenhang mit den Aptychen behandelt.

SEILACHER hat die Richtung des Drehsinns von Ammoniten-Gehäusen festlegen können (1963, S. 599). Seine Ausführungen sind nach unseren Untersuchungen zu bestätigen.

Bei den Perisphincten bestanden zwei Transportmöglichkeiten. Selten trieb das Gehäuse mit seiner Breitseite senkrecht zur Strömung. Häufiger erfolgte die Einregelung nach der Schmalseite. Dann wurden die Rippen auf der Externseite oftmals zum Ansatzpunkt der drehenden Kraft. Sie hatten den gleichen Effekt wie die Schaufeln eines Mühlrades. Die Mühlrad-Wirkung wurde beim „Mündungssprung" (s. a. SEILACHER 1963, S. 599) noch erhöht, da die Mündung, plötzlich der Strömung ausgesetzt, die Eigenschaft einer Pelton-Schaufel annahm und den Sprung kräftiger gestaltete.

Dieser Mechanismus des Rollens bei Perisphincten wird verständlich, wenn man beachtet, daß Ammoniten ohne Querskulptur auf der Externseite niemals derartige Sequenzen hinterließen. Formen mit glatter Externseite wurden entweder einfach „geschoben" oder trudelten, wie die Aspidoceraten.

Manchmal kam es auch zur Bildung von Schleifmarken, d. h. die Strömung war nicht stark genug um die Rollbewegung zu vollbringen. Um den Rollvorgang bei Perisphincten zu rekonstruieren, wurden Versuche angestellt. Herr Oberpräparator E. SCHMIEJA fertigte nach einem Abguß ein „leeres" Ammonitengehäuse aus Plastik an. Der „Phragmokon" enthält Luft, ist nicht unterteilt und kann mit Wasser gefüllt werden. Das Gehäuse wurde ins Wasser gelegt, schnell füllte sich die Wohnkammer und brachte somit die vertikale „Schwimmstellung" zustande. Die vertikale Stellung wurde auch beibehalten als soviel Wasser in den Luftkammern war, daß das Gehäuse mit seiner Unterseite am Grund aufsaß. Erst bei gänzlicher Füllung kippte es um. War gelegentlich die Öffnung der Wohnkammer durch eine Luftblase verschlossen geblieben, trieb das Gehäuse angenähert horizontal an der Oberfläche.

Die Ergebnisse beweisen uns zunächst, daß die Ammoniten-Schalen nicht gänzlich mit Wasser gefüllt sein konnten. Wäre dies geschehen, hätte eine sehr beträchtliche Strömung wirken müssen. Im Strömungskanal des Institutes für

Hydraulik der Technischen Hochschule München blieb das wassergefüllte Testgehäuse bei etwa 40 cm Tiefe und einer Oberflächen-Geschwindigkeit von ungefähr 60 cm/sec noch am Grunde liegen. Teilweise mit Luft gefüllt behielt das Gehäuse seine vertikale Position bei, drehte sich jedoch nicht. Es lag wohl daran, daß beim künstlichen Ammoniten nur die Wohnkammer von dem einzigen hier ungegliederten Luftraum abgetrennt war. Es sammelte sich deshalb im oberen Schalenteil die gesamte enthaltene Luft, deren Auftrieb beim Drehen nicht überwunden werden konnte.

Herr SCHMIEJA stellte daraufhin wieder ein Modell her, das eine Luftkammer im Zentrum und mehrere, nach außen spiralig anschließende hat. Die Verhältnisse entsprechen also in großen Zügen denen einer wirklichen Ammonitenschale. Jede Kammer kann mit einer Injektionsspritze mit Wasser gefüllt oder wieder entleert werden. Der Versuch verlief erfolgreich.

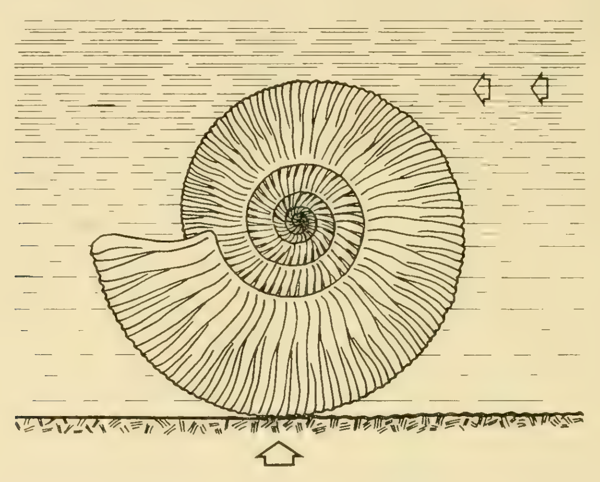


Abb. 1: Schematische Darstellung des Rollens bei Perisphinctiden. Je dichter die Wasser-Signatur, umso stärker ist die Strömung. Sie greift demnach am oberen Teil des aufgerichteten Gehäuses an und bewirkt Schub an ihm. Unten am Boden wird jedoch das Gehäuse durch Reibung gebremst. Das Zusammenwirken dieser beiden Faktoren bringt die Rollbewegung zustande.

In einem Becken 70×70 cm wurde der Boden mit Ton ausgekleidet. Um etwa gleichmäßige Strömung zu erhalten wurden zwei Glasplatten parallel zueinander und senkrecht in geringer Entfernung aufgestellt. Nachdem genügend Wasser in das Becken eingelaufen war wurde der Strom gleichlaufend zu den Glasplatten gerichtet und der „Ammonit“ in Schwimmstellung frei, jedoch etwas den Boden berührend, zwischen die Glasplatten gebracht. Verlief der Wasserstrom dicht über dem Boden, trieb es den „Ammoniten“, ohne ihn um seine Achse zu rollen, durch den Versuchskanal. Sobald jedoch die Hauptströmung näher zur Wasseroberfläche verlegt wurde, begann die Schale sich zu drehen. Bei größerer Wassertiefe ist dazu entsprechend höhere Strömungsge-

schwindigkeit an der Oberfläche erforderlich. Bei dem Versuch war der Wasserstand etwa 15 cm. Die Oberflächen-Geschwindigkeit erreichte etwa 12 cm/sec. Der Durchmesser des „Ammoniten“ beträgt 4,2 cm. Das Leergewicht ist 5 gr.

Durch das Experiment wurden folgende Resultate gewonnen:

1. Die Ammonitenschale muß im Phragmokon gerade soviel Luft enthalten, daß sie leicht am Grund aufsetzen kann, ohne dabei ihre senkrechte Position zu verlieren. Die Mündung der Wohnkammer ist dabei fast nach oben gerichtet.
2. Die bewegende Strömung kann laminar bis schwach turbulent sein. Sie verläuft nicht in unmittelbarer Bodennähe.
3. Zur Rotation des Perisphincten-Gehäuses sind zwei Voraussetzungen notwendig. Es muß a) mit der Externseite der Wohnkammer leicht den Grund berühren und b) hat der bewegende Schub bei verticaler Stellung der Schale oben anzusetzen. Reibung und Bremsung an der Unterlage werden von genügend starkem Strömungs-Schub am Oberteil des Gehäuses überwunden. Daher kommt es zur Rotation (s. Abb.).
4. Vollständig mit Wasser gefüllte Ammoniten-Gehäuse bleiben auch bei bedeutender Strömung in horizontaler Stellung am Grund, besonders wenn das Sediment eine gewisse Haftfähigkeit besitzt.

Gleichmäßige Strömungen, die Bewegungen von Ammoniten-Gehäusen zustandebringen konnten, entstanden nach unseren Überlegungen (s. a. unten) bei Wasserspiegel-Erhöhungen oder -Senkungen in den Wannen.

Die Untersuchung der Paintener Platten bestätigt die Ergebnisse SEILACHER's weitgehend. Nur einem Punkt kann ich nach unseren Experimenten nicht beipflichten. SEILACHER (1963, S. 607) vertritt die Meinung, daß die Rollmarken durch wasser- oder schlammgefüllte Schalen verursacht wurden. Oben habe ich zu belegen versucht, daß diese Deutung nicht zutreffend ist.

Inwieweit die Annahme SEILACHER's (1963, S. 606) in bezug der Überlieferung von Rollmarken auf Oberseite oder Unterseite in den verschiedenen Bruch-Revieren verallgemeinert werden kann, entzieht sich meiner Kenntnis. Die Eindrücke der Rollmarken auf unseren Paintener Platten liegen jedenfalls auf der Oberseite.

A. 2. b. Unterseiten

Zunächst die Platte aus dem Bruch Rashofer (Taf. 10). Sie zeigt als auffälligste Erscheinung etwa 0,5 cm hohe und bis 2 cm breite Wülste. Bevorzugte Richtung ihres Verlaufs ist ca. N 60 E. Die Wülste ziehen sinusartig, teils auch zackig über die Platte, anastomieren des öfteren und bilden ein unregelmäßig-polygonales Netz. Der Abstand der Wülste beträgt zwischen 10 und 20 cm.

Ein weiteres feinmaschiges und weniger auffallendes Muster besteht aus einem mehr oder minder regelmäßigen System von Polygonen, vorzüglich Hexagonen. Die Wülste sind diesem feineren Netz aus etwa 3 mm breiten Rillen einbezogen worden. Die Rillen sind auch auf den Kämmen der Wülste wahrzunehmen.

Neben den anorganischen Eigenheiten enthält die Plattenunterseite noch eine Anzahl von Organismen-Relikten und Abdrücken. So fanden sich 4 Bruchstücke von Laevaptychen, je 1 Abdruck eines einzelnen und eines Aptychenpaares. Fischschuppen und -einzelreste sind über die gesamte Platte verbreitet, während Anhäufung nur an 6 Stellen auftritt, wobei es sich um zerfallene Köpfe handeln dürfte. Fischkoprolithen (Lumbricarien) wurden 3 gezählt, dazu kommen 2 Abdrücke. Auffallend häufig sind Pflanzenreste: 6 Zweigfragmente und 1 fertiler Rest (?) sind sichtbar. Sie gehören der Gattung *Palaeocyparis* an. WALTHER (1904, S. 141) hat sie aus der Kelheimer Gegend als zahlreich angegeben. Auch ein Fieder-Stück, vermutlich von *Cycadopteris* ist zu sehen.

Da die Furchen häufig anastomisieren, handelt es sich wohl nicht um einfache Rippeln. Interferenz zweier Strömungen wird stattgefunden haben, zumindest im näheren Bereich, dem die Platte entnommen ist.

Die Pflanzenreste liegen in den Furchen. Ist dies nicht der Fall, dann haben sie das unterliegende Sediment vor dem ablaufenden Wasser geschützt. Sie reichen somit stärker in die Hangendplatte und beweisen, daß die Rippeln verwaschen sind, d. h. ehemals höher waren. Aptychenreste und Aptychenabdrücke liegen „gewölbt-unten“ (R. RICHTER 1942). Den Nebenfall der Einkippungsregel von R. RICHTER (1942, S. 204, 1e) Einsinken im Schlamm, sehe ich als gegeben an. Daß sich die Aptychenreste überwiegend an der Unterseite der Hangendplatte befinden ist natürlich. Herausragende Teile der Aptychen wurden durch den hangenden Kalk stärker festgehalten, als durch die liegende Fäule. Dies gilt auch für die anderen, der Unterseite anhaftenden Reste.

Das feine Polygon-Muster läßt sich als Trockenrisse, die nach Wasserablauf entstanden, erklären.

In unserem Fall sind es Trockenrisse, wie sie in homogenen Ablagerungen entstehen, z. B. in solchen Playas. SHROCK 1948 (S. 196, Abb. 155A) zeigt ein Bild von Playa-Trockenrissen, das in Form und Ausbildung den unseren entspricht. Bei erneuter Überflutung wurden die Sprünge mit Material ausgefüllt, das der Setzung wiederstandsfähiger gegenüberstand, als das, in dem die Sprünge klafften. Deshalb erscheinen die Trockenrisse auf der Oberseite der Liegendplatte positiv anstelle negativ. Bei der Verfüllung der Sprünge wurde auch Luft mit eingeschlossen, in den entstandenen Luftblasen wurde später Kalzit ausgeschieden. Dies geschah offenbar noch vor der engdültigen Setzung, denn auf der Unterseite der Platte, entlang der hier als Rillen (s. oben) abgedrückten Sprünge finden sich häufig feine Kalzitdrusen-Schnüre.

Der Plattenunterseite haftet stellenweise die Liegendfäule an. In ihr sind Trockenrisse nicht mehr zu erkennen. Dagegen haben die Furchen (s. oben) wegen starker Setzung der Fäule selbst in der liegenden Kalkplatte Abdrücke hinterlassen. Damit dies geschehen konnte, mußte unsere Platte schneller verhärtet sein als die darunterliegende.

Vom Aussehen der Plattenunterseite können wir folgendes ableiten: 1. Anlage von Rippelmarken in seichtem Wasser. 2. Verwaschen der Rippelmarken.

3. Entstehung von Trockenrissen und 4. Verfüllen der Risse zu Beginn der Sedimentation unserer Platte. Die Bildung von Rippeln war möglich, da das Sediment offenbar nicht die Feinheit besaß, die bei Plattenkalken üblich ist.

Die andere Platte aus dem Steinbruch Rygol ist nicht eingemessen worden. Die Richtung der Rippelmarken ist also nicht gesichert. Unterschiede gegenüber der Unterseite der Rashofer-Platte beschränken sich, mit einer Ausnahme, auf unbedeutende Details. Der Verlauf der Rippelmarken ist deutlicher parallel angeordnet und weist weniger Querverbindungen auf. Im Gegensatz zur gleichen Schichtfläche im Rashofer-Bruch waren hier beim Entstehen der Rippelmarken keine interferierenden Wasserbewegungen wirksam.

Zweifellos handelt es sich bei beiden Platten um die gleiche Schichtfläche. Wie SEILACHER (1963, S. 606) bereits andeutet, eignen sich solche charakteristische Schichtausbildungen besonders gut zur Parallelisierung.

Die Unterseite unserer Platte ist das negative Abbild der darunterliegenden Schicht. Um die Deutung dieser Liegendschicht zu vereinfachen, wurde ein Lackabzug angefertigt. Die „Wülste“ erscheinen dann als Furchen, die zwischen flachen, weiten Rücken liegen. Solche Erscheinungen werden im rezenten Watt als verwaschene Rippelmarken bezeichnet. Sehr ähnlich sind auch „Flachstwasser-Rippeln“.

B. Plattenkalkentstehung nach neuen Erkenntnissen

1. Geschichtliches; ähnliche Sedimente in Frankreich und Spanien

Den beschriebenen Fossilien und Marken ist eines gemeinsam: sie sind unter kaum bewegtem Wasser abgelagert worden. Diese Feststellung wird mit den bisher bekannten Ansichten über die Entstehung der Solnhofener Plattenkalke verglichen.

Rein marine Bildung der Plattenkalke unter Wasserbedeckung wird von GÜMBEL angenommen (1891, s. unten). Er vermutete schon 1889, S. 13 die lithographischen Kalke seien aus Coccolithen-Schlamm entstanden, der durch diagenetische Vorgänge umgewandelt wurde.

KRUMBECK (1928) tritt ebenfalls für vollmarine Entstehungsweise ein. Er nennt DEECKE, JAECKEL und SALOMON, die jeweils auf andere Art damit konform gehen.

Demgegenüber stehen die Verfechter der „Trockenlegungs“-Hypothese, die in ABEL einen ihrer bekanntesten Verteidiger hat. 1927 gab ABEL in seinen „Lebensbildern“ neben einer glänzenden Schilderung und Deutung der Plattenkalke und ihres Milieus aus seiner Warte auch eine Übersicht anderer Erklärungen. Dabei werden NEUMAYR, WALTHER, ROTHPLETZ und SCHWERTSCHLAGER erwähnt. Als bedeutendsten Punkt ihrer Beweisführung verwenden die Anhänger der Trockenlegungs-Hypothese die ausgezeichnete Konservierung der Fossilien. Diese seien durch kurzzeitige Überflutungen an Ort und Stelle gestrandet wor-

den, nachdem die See sich zurückgezogen hatte. Durch Austrocknung der Kadaver und anschließende Eindeckung mit äolischen Sedimenten sei die Erhaltung gewährleistet worden.

Wegen der Herkunft der äolischen Sedimente und aufgrund paläogeographischer Überlegungen war die Lage der Festländer für die Vertreter der Trockenlegungs-Hypothese von großer Bedeutung. So benutzt auch O. Kuhn (1961) noch zu seinen Argumentationen die älteren Ansichten über das Vindelizische Festland und die „Gansheimer Straße". Wie jedoch Fesefeldt (1962, S. 48 u. 56/57) klarlegte, kam es im Obermalm nicht mehr zum Auftauchen des Vindelizischen Landes; die Gansheimer Straße hat nie existiert. Die Küste des Obermalm-Meeres lag im Norden und die See brandete gegen die südlichen Gestade der Mitteldeutschen Insel mit ihrem vorgelagerten Riffsaum.

Dem Aussehen der Solnhofener Platten sehr ähnlich sind auch die von Nusplingen, so daß man an gleichen oder ähnlichem Ursprung denken möchte. Die erste moderne Untersuchung des Württemberger Vorkommens lieferte Aldinger 1930, der kaum Zweifel an der submarinen Entstehung läßt. Fahrion neigt 1937, nach Analyse der Fauna von Nusplingen, dazu, eine Lagune mit ungünstigen Lebensbedingungen anzunehmen. Die Fauna wäre nach ihm zur Mehrzahl bereits tot eingedriftet worden. Nachweise von Trockenlegungen fehlen. Ebenfalls 1937 unternahm Fuchs eine petrographische Untersuchung der Nusplinger Kalke. Er deutet die plattigen Kalke als primär kalzitische Ausscheidungen, während die Brekzienbänke aus ursprünglich aragonitischem Material bestanden hätten.

In einer kürzlich (1964) erschienenen Arbeit über die Plattenkalke der Schwäbischen Alb nimmt H. Temmler Bildungstiefen von mehr als 100 m an, während er für Solnhofen, Cerin und Montsech an Lagunen im Backreef-Bereich denkt. Temmler kommt anhand seiner petrographischen Untersuchungen zum Schluß, daß die letztgenannten Vorkommen in genetischer Hinsicht sich wesentlich von den Nusplinger Plattenkalken unterscheiden.

Es gibt noch einige weitere Bildungen, die in Fazies und Fauna den Solnhofener Plattenkalken sehr gleichen, darunter die bekannten Vorkommen von Cerin (Ain, franz. Jura) und Montsech (Lérida, NE-Spanien). Beide Fundstellen sollen älter sein als die bayerischen (unt. Kimmeridge sensu Arkell).

Die Plattenkalke von Cerin haben sich nach Saint-Seine (1948, S. 307—310) unter Bedingungen gebildet, wie man sie heute im Great Barrier Reef antrifft. Das Wasser der Rinnen oder „Kanäle" im Great Barrier Reef erreicht bei Tag während der Ebbe hohe Temperaturen und Salzgehalte, wogegen bei nächtlichem Wassertiefstand der Sauerstoffgehalt stark absinkt. Beide Ursachen führen nicht selten zu örtlichem Absterben der Tierwelt. In einem solchen Kanal sollen die Kalke von Cerin abgelagert worden sein. Etwas andere Bedingungen hätten in Solnhofen geherrscht, dort seien die Kalke in den Atoll-Lagunen eines Korallen-Archipels entstanden. Damit will Saint-seine wohl eine marine Kontinuität andeuten.

Am Montsech sind die Plattenkalke wegen bedeutender Lücken im Hangenden und Liegenden nur ungefähr zeitlich einzuordnen. Ihr Liegendes besteht aus Dolomiten des Dogger, während sie im Hangenden von Urgo-Apt überlagert werden. Es ist dies der einzige Nachweis von Oberjura in der Provinz Lérida. ALMELA & RIOS (1947) sprechen von Portland-Alter (= mittl. Kimmeridge sensu ARKELL), die meisten Autoren dagegen treten für höheres Unterkimmeridge ein. Die Plattenkalke von Montsech sind marinen Ursprungs und enthalten brackische Einschaltungen (ALMELA & RIOS 1947, S. 77). Ihr Ablagerungsraum dürfte eine seichte Küstenbucht gewesen sein.

BROILI (1932, S. 10) verglich Cerin, Montsech und Solnhofen anhand von Fauna und Fazies. Nach seiner Ansicht herrschten an den drei Orten die gleichen Bildungsbedingungen. Wie bei der Entstehung der Solnhofener Plattenkalke soll episodisches Trockenfallen der Schichtflächen stattgefunden haben. Soweit ich in Erfahrung bringen konnte spricht aber in Montsech nichts gegen eine Entstehung unter ständiger Wasserbedeckung.

Es sollte sich daher lohnen, auch die bayerischen Plattenkalke erneut auf möglichen subaquatischen Ursprung zu prüfen.

B. 2. Wasserbewegung

Die ausgezeichnete Schichtung der Plattenkalke deutet einerseits auf Sedimentation in ruhigem Wasser; andererseits kennen wir jedoch Beweise für Wasserbewegung. Deren Wirkung und Spuren sollen nun untersucht werden.

Drift- und Rippelmarken lassen unmittelbar erkennen, daß sich das Wasser in den Plattenkalk-Wannen in Bewegung befand. Mittelbar bedeuten seltene Trockenrisse durch ihre Wiedereindeckung eine Zeit kurzen Wasserrückzugs mit darauffolgender Überflutung. Die zahlreichen Ammoniten-Rollmarken auf den Platten von Painten sind geregelt. Eine Hauptströmungsrichtung ist damit erkennbar. Daneben liegen auch Beweise für eine Änderung der Strömungsrichtung vor. Weit weniger deutlich zeigen die Platten nämlich eine zweite Rollmarken-Regelung, die mit der ersten einen Winkel (s. S. 43) bildet. Unter den Marken der Hauptrichtung lassen sich jüngere und ältere auseinanderhalten, denn die ersten sind durch die folgenden teilweise verwischt. Daraus ist abzuleiten, daß die Strömung andauerte. Über die Zeitspanne ist leider nichts zu ergründen. Könnte sie ermittelt werden, so wären Aussagen bezüglich einer Mindestdauer der Sedimentations-Unterbrechung für diese Schichtfläche möglich. Zwei verschiedene Strömungsrichtungen, durch Regelung von Rollmarken auf den Platten fixiert, gestatten jedenfalls die Annahme, daß zur Bildung der Marken eine gewisse Zeit verstrich. Allmählicher Umschwung der Strömungsrichtung hätte sich ohne Zweifel durch häufigere Marken, die zwischen Haupt- und Nebenrichtung vermitteln, angezeigt.

Unregelmäßig begrenzte, flache Becken mit relativ geringer Wasserbedekkung besitzen charakteristische Strömungsverhältnisse über die man in Atoll-

Lagunen Erfahrungen gewonnen hat. Sie haben mit unseren Wannen neben den genannten Eigenschaften die engen Zugänge zur offenen See gemeinsam, sind jedoch im Gegensatz dazu vom Pazifik nur durch schmale Landstreifen getrennt. Die Wannen dagegen waren zwar unter sich und mit dem Meer verbunden, aber außerdem von ausgedehnten riffartigen Faziesbereichen umgeben. Trotz dieser Unterschiede darf der Vergleich gewagt werden. WIENS (1962, S. 216 ff., Abb. 71/72) berichtet, daß Windrichtung und Lagunenform die Strömungen in den oberflächennahen Wasserschichten beeinflussen. Die Geschwindigkeit der Wasserbewegung wird bei WIENS für 25 cm/sec im Sommer angegeben.

Durch Wind hervorgerufene Oberflächenstömung bewirkt in den tieferen Wasserschichten sekundäre Strömung (bottom circulation — vgl. WIENS 1962), besonders beeinflußt durch Form und Tiefe des Beckens. Periodische Winde oder Gezeiten können Wasserbewegungen mit regelmäßiger Richtungsänderung erzeugen und damit Oszillationsrippeln hervorrufen.

Konvektionsströmungen bringen Flüssigkeitsaustausch zustande. Voraussetzung dafür sind allerdings Dichteunterschiede in verschiedenen Wasserstockwerken oder Temperaturdifferenzen. Diese Wasserbewegung spielt sich vorwiegend in vertikaler Richtung ab.

Endlich ist auf mögliche Gezeitenströmung zu achten und, falls diese nicht in Betracht gezogen werden kann, auf die Erneuerung von Wasser in den Wannen. Dabei ist bei zukünftigen Untersuchungen darauf zu berücksichtigen, ob Strömungsmarken auf einen bestimmten Punkt zu oder von ihm weisen: Verbindung mit der See oder einer anderen Wanne.

Sind nun diese Typen von Wasserbewegung alle zusammen oder einzeln, andauernd oder nur episodisch im Ablagerungsbereich der Solnhofener Plattenkalke wirksam gewesen?

Gegen gleichbleibende stärkere Wasserbewegung spricht allgemein die Tatsache, daß die Sedimentation sehr ruhig verlief. An verschiedenen Stellen der Wannen bestanden jedoch Strömungen. Wie könnte man sonst Aufarbeitungslagen (STREIM 1961, S. 25) in der Paintner Gegend, Lagen von Geröllen, die bei Zerstörung einer Krummen Lage entstanden, in den Plattenkalken um Eichstätt erklären? Gelegentliche Funde von Oszillatinsrippeln sprechen für Windwirkung. Die Vorgänge müssen sich jedoch in randlichen, riffnahen Partien der Wannen und seichtem Wasser abgespielt haben, wofür mancherorts die Anreicherung von Riff-Feinschutt in den Plattenkalken spricht. Insgesamt darf dagegen der Effekt des Windes auf die Wasserströmung nach den vorliegenden Zeugnissen als gering vermutet werden.

Ist die Annahme (s. unten) von Faulschlammbildung am Grund der Wannen richtig, dann hat die bedeckende Wassermasse ausgesprochene Schichtung gezeigt. Aus vergleichbaren rezenten Becken mit stagnierendem Tiefen-Wasser ist diese Tatsache bekannt (FLEMING & REVELLE 1939 (1955), STROM 1939 (1955)). Stabile Wasserschichtung hindert aber nach FLEMING & REVELLE (1939

(1955), S. 100) Konvektionsströmungen. Bei hohen, tropischen Temperaturen, wie sie sich indirekt zur Zeit des Oberen Malm durch Korallen u. a. belegen lassen, wird nach diesen Autoren (S. 101) die Schichtung derart resistent, daß selbst bei Windeinwirkung die Durchmischung des Wassers schwierig wird. Konvektionsströmungen sind damit in den Solnhofener Wannen als wenig wahrscheinlich zu betrachten.

Wasseraustausch in den Wannen dürfte der wichtigste Strömungsvorgang gewesen sein. Daß diese Vorgänge nicht durch normale Gezeiten hervorgerufen wurden, hat letztlich FESEFELDT (1962, S. 38) wahrscheinlich gemacht. Episodisches Eindringen von größeren Mengen frischen Meerwassers durchmischte die geschichteten Altwässer in den Wannen. Dabei wird auch das sehr salz- und H_2S-haltige Wasser des Grundes aufgerührt und bringt die mit frischem Seewasser eingebrachte Fauna zum Absterben. Bei sinkendem Meeresspiegel flossen beträchtliche Wassermengen aus den Wannen ab; dadurch entstand langsame, gleichmäßige Strömung. Im Gegensatz dazu war der normale, regelmäßige Wasseraustausch an der Oberfläche gering und hat die in den Wannen herrschende Flüssigkeitsschichtung kaum gestört. So ist davon eine kräftigere Strömung, insbesondere am Grund, nicht zu erwarten.

Summarisch lassen sich unsere Ergebnisse über die Strömungen in den Plattenkalk-Wannen folgendermaßen formulieren: 1. stärkere Strömungen, auf Wind zurückzuführen, waren an einigen Stellen, besonders an den Wannenrändern wirksam. 2. Wasserbewegungen, hervorgerufen durch periodischen Wind, lassen sich anhand seltener Oszillationsrippeln belegen. 3. Konvektionsströmungen sind wenig wahrscheinlich. 4. die überwiegenden, gleichmäßigen Strömungen erklären sich durch Wasseraustausch zwischen Wannen und offenem Meer. In diesem Zeitraum wurde wenig oder nicht sedimentiert.

Die Art der Strömung scheint nach den meisten Bewegungsmarken ± laminar gewesen zu sein (SEILACHER 1963, S. 607). Lokal kann der Nachweis völligen Wasserstillstands erbracht werden.

Nachdem wir uns mit den Wasserbewegungen beschäftigt haben, wollen wir das Interesse dem Sediment zuwenden.

B. 3. Sediment

Das Sediment liegt heute als lichtgelber bis lichtgrauer, manchmal dunkelgrauer, plattiger Kalkstein vor. Trennfugen sind meist durch beträchtlichen Tongehalt verursacht. Die ausgezeichnete, oft schieferartige Schichtung der Solnhofener Plattenkalke ist auf die abwechselnde Sedimentation von reinem Kalkschlamm mit tonigem Kalkschlamm zurückzuführen. Verschiedentlich entstehen Trennfugen auch durch Sedimentations-Unterbrechung. Der Setzungsbetrag während der Diagenese ist vom Tongehalt abhängig. Abgelesen an der Verdrückung enthaltener Fossilien dürfte die ursprüngliche Schichtmächtigkeit das 4—8fache der überlieferten betragen haben, möglicherweise sogar mehr.

Wir dürfen deshalb annehmen, daß nicht nur die tonigen sondern auch die kalkigen Anteile des Sediments bei der Ablagerung sehr wasserhaltig waren.

Die Oberfläche dieses Sediments war immerhin stabil genug, trotz der Strömungen, Bewegungsspuren und -marken in ausgezeichneter Weise zu erhalten, da sie offenbar bereits unter Wasser abzubinden begann. Ein Beispiel zeigt uns Taf. 8, Fig. 1: die Schleppmarke eines Perisphinctengehäuses, das mit seiner Breitseite senkrecht zur Strömung orientiert war. Auf der Oberseite der Schicht hatte sich ein Häutchen gebildet, das offenbar ein Schutzfilm war. Es wurde durch Schleifen des Ammoniten-Gehäuses verletzt und mitgezogen. Dabei entstand die fiederartige Streifung neben der eigentlichen Marke, die zugleich die Bewegungsrichtung markiert. Auch die klaren und deutlichen Eindrücke der Ammoniten-Rollmarken weisen darauf hin, daß sich die Oberfläche des Sediments abgebunden hatte (Kalkhäutchen!). Andererseits erlaubte das Sediment die Abbildung der Anhänge driftender Quallen und Spuren von Krebsen, damit seine Empfindlichkeit anzeigend. Dieser weiche Kalkschlamm, so könnte man annehmen, beherbergte eine reiche Fauna grabender Tiere. Doch gehört dergleichen zu den seltenen Funden, die man nur dort antrifft, wo auch Zeichen guter Wasserdurchlüftung vorliegen. Das Sediment selbst bietet uns in einzelnen Fällen eine Erklärung dieser Eigentümlichkeit. Es gibt nämlich eine blaugraue bis schwärzliche Gesteinsvarietät, die beim Anschlag bituminösen Geruch verbreitet. Nur dort, wo keinerlei Verwitterung einwirken konnte wurde der Solnhofener Plattenkalk in dieser urspünglichen Ausbildung überliefert. Eine besonders typische Lokalität ist der „Blaubruch Lichtenberg“ am Maxberg über Solnhofen und Mörnsheim. Er liefert aus großer Tiefe und nahezu ungestörtem Gesteinsverband die begehrte Abart der Solnhofener Lithographiesteine (s. a. WALTHER 1904, S. 209). Eine anpolierte Platte im Museum des Solnhofner Aktienvereins, am Maxberg, zeigt den Verwitterungsvorgang, der schließlich das gewohnte Bild der Solnhofener Schiefer hervorbrachte. Die große, von Klüften begrenzte Platte zeigt, wie die dunkelblaugrauen Farben der unverwitterten Mitte nach außen ins Bräunliche übergehen und, je näher den Klüften, um so heller werden. Feinverteilter Pyrit verursacht die dunkle Farbe. Von den Klüften her vollzieht sich die Umwandlung des Pyrits in Brauneisen. GÜMBEL hat zudem (1891, S. 282) darauf hingewiesen, daß die dunklen Kalke organische Substanzen enthalten.

In den Solnhofener Wannen wurde demnach nicht gut durchlüftetes Sediment, sondern weitgehend H_2S-reicher Schlamm gebildet. Der subaquatische Ursprung läßt sich somit kaum leugnen. Im Licht dieser Erkenntnis muß daher auch die Deutung der Fossileinbettung betrachtet werden.

B. 4. Einbettung der verschiedenen Tiertypen unter Wasser

Unter den Protozoen kommen gelegentlich, in Fäulen angereichert Radiolarien vor, die jedoch umkristallisiert sind (frdl. mdl. Angabe v. Prof. Dr. H. HAGN). Sie wurden beim Einströmen frischen Wassers aus der See in die Wannen eingeschwemmt.

Die bekannten Medusenvorkommen von Gungolding (Pfalzpaint) waren als Beweis für Trockenlegung herangezogen worden. Auffällig ist jedoch, daß selten Schleifspuren aus der Gungoldinger Gegend bekannt geworden sind. Die Medusen müssen daher angenähert senkrecht von oben abgesetzt worden sein, was die Gegenwart von Wasser und Fehlen von kräftiger Wasserbewegung voraussetzt. Wenn wir aber annehmen, die Medusen seien abgestorben sobald sie in das hypersaline Wasser (s. unten) der Wannen gelangten, müssen wir mit einer gewissen Schwebezeit rechnen, bevor die toten Tiere den Grund erreichten. Da der Zerfall in übersalzenem Wasser verlangsamt wird, müssen auch die Quallen auf Grund ihrer 2% Trockensubstanz absinken, wie auch abgestorbenes Plankton hinab„rieselt". Die Fähigkeit einen Abdruck zu hinterlassen hatten die Tiere jedenfalls entgegen der Meinung Schäfer's (1962, S. 13, gültig für die Nordsee). Dies beweisen die von Kolb (1951, Taf. 2) abgebildeten Schleifspuren und die Umlagerungsspuren von Medusen auf einer Platte in der hiesigen Sammlung. Die Spuren wurden zweifellos unter Wasser gebildet. Unter Wasser auf der Sedimentoberfläche erzeugte Abdrücke konnten erhalten und überliefert werden, selbst wenn die zarte organische Substanz vor der Bildung der nächsten Schicht zerstört war. Walcott (1898, S. 7) nimmt subaquatische Einbettung für Kambrische Quallen an. Bei der Besprechung der Solnhofener Medusen (1898, S. 68) folgt er jedoch den Autoren, die Stranden für erforderlich halten. Platte und Gegenplatte einiger Medusenabdrücke die ich vergleichen konnte, scheinen nicht unterschiedlich zu sein. Kieslinger's Ergebnisse (1939) sollten aus diesem Gesichtspunkt noch einmal betrachtet werden. Stranden und anschließendes Eintrocknen der Medusen halte ich schon deshalb für unmöglich, weil das Sediment sonst Trockenrisse aufweisen müßte. Trockenrisse kommen relativ selten in den Plattenkalken vor, soweit mir bekannt ist, nie zusammen mit Quallen.

Schwämme sind äußerst selten. Nach der Art ihrer Einbettung haben sie nicht an Ort und Stelle gelebt. Sie wurden aus ihrer Verankerung gerissen und wie die anderen Fossilien durch Strömungen in die Wannen gebracht. Ebenso gerieten die nicht minder seltenen Brachiopoden, mit ihrem Stiel an einem schwimmenden Objekt festgehalten, in die Wannen.

Von den spärlichen echten Würmern sind keine Lebensspuren vorhanden. Sie wurden eingebettet, wie sie niedersanken: Hinweise auf Trockenlegung, wie sie Schäfer (1962, S. 203) verlangt, fehlen. Das beste Beispiel dafür, daß Trockenlegung zur Erhaltung feinster Einzelheiten nicht nötig ist, haben die Burgess Shales geliefert, die ebenso unter Wasser entstanden sind. Grabgänge und Marken, die gegebenenfalls auf Würmer zurückgeführt werden könnten, sind mir nur aus Wannenteilen bekannt geworden, in denen sich Anzeichen besserer Durchlüftung nachweisen lassen.

Schnecken und Muscheln findet man nicht häufig. Die Tiere wurden vermutlich durch Tangballen eingedriftet. Sie waren wohl meist verendet bevor sie auf den Grund kamen. Daher gehören Muschelspuren, an deren Ende klaffend das Fossil liegt, zu den Besonderheiten (Dacqué, 1936, Taf. 14, Fig. 35). Die

Muschel konnte sich noch eine Strecke fortbewegen, verendete aber schließlich wegen Sauerstoffmangels. Das Graben der Muschel darf als Beweis für Wasserbedeckung gelten, denn aufs Trockene geworfen hätte sie, ohne weiterzukriechen, ihre Schalen fest geschlossen gehalten. Obwohl man sonst aus den Bankkalken des süddeutschen Obermalm viele Muscheln unter den Sedimentwühlern trifft, fehlt dieser Molluskentyp in den Wannen nahezu vollständig. Häufiger sind dagegen Austern, die auf Ammoniten-Gehäusen und ähnlichen schwimmfähigen Dingen festgewachsen sind und mit diesen vom Meer hereingetragen worden sind.

Nur wenige Schnecken sind aus den Plattenkalken bekannt. Sie waren alle Meeresbewohner. Gelegentlich gibt es Anhäufungen kleiner Schnecken, die Kriechspuren in der Nähe des Gegenstandes, mit dem sie eingeschleppt wurden hinterließen.

Den besten Beweis, daß auch die Tintenfische (Teuthoidea, Belemnoidea) unter Wasserbedeckung eingebettet wurden, liefern gelegentlich die Belemniten (S. 39 u. f.) und *Plesioteuthis prisca* Rueppell (Taf. 9, Fig. 2). Die abgebildete *Plesioteuthis* driftete mit dem Kopf nach unten, haftete mit den Fangarmen am Grund, hinterließ dort eine achtstrahlige Sternmarke und wurde schließlich von minimalen Strömungen neben der Marke der Länge nach in den Schlamm gelegt. Dies kann nicht durch eine rasch einkommende und ebenso schnell verlaufende „Flutwelle“ geschehen. Selbst große Tintenfische wie *Leptoteuthis* wurden uns in prachtvoller Erhaltung überliefert. Daneben finden sich nicht selten abgerissene Arme und Schulp-Bruchstücke. Nach Schäfer (1962, S. 192) würde es sich dabei um Reste zerfallender, eingetriebener Tiere handeln, während die besterhaltenen Tiere sicher erst in der Wanne zugrunde gingen.

Die tadellose Überlieferung der schulptragenden Tintenfische läßt verwundern, warum bisher nie Weichteile von Ammoniten bekannt wurden. Ich möchte das damit erklären: leere Ammonitengehäuse hatten sich am Strand außerhalb der Wannen angesammelt; die Schalen wurden später vom Wasser erfaßt und in die Wannen eingeschwemmt. Kolb (1961) versucht zwar aus einer Schleifmarke, die in Zusammenhang mit einem Gehäuse steht, die Weichteile des Tieres und dessen Form abzuleiten. Doch ist auch hier eigentümlich, daß keine Spur vom Weichkörper des Tieres gefunden wurde. Möglicherweise waren es leicht zerstörbare Tange oder Algen, die sich am Ammonitengehäuse festgesetzt hatten und die Marken erzeugten.

Nach dem Tod des Ammoniten wird durch Verwesungsgase der Auftrieb verstärkt, die Weichteile fallen heraus und das Gehäuse schwimmt somit allein. Solange sich das Tier in der Wohnkammer befand, konnte es zu keiner Einbettung kommen. Auch die anderen in die Wannen eingeschwemmten leeren Ammonitenschalen konnten erst wieder niedergehen, nachdem sie sich mit Wasser gefüllt hatten. Daraufhin wurde nämlich das Gewicht des Gehäuses wirksam. Rothpletz studierte 1909 die Einbettungsweise der Ammonitengehäuse in den Plattenkalken. Nach seiner Meinung wurde der Auftrieb, der zur Erklärung der Schicht-

verformung im Bereich der Ammonitenschalen notwendig erscheint, durch Verwesungsgase bewirkt. Waren jedoch die Gehäuse bereits leer bevor sie eingebettet wurden, so konnten sich Verwesungsgase nicht mehr bilden. Es bietet sich dann folgende Deutungsmöglichkeit: Eine Ammonitenschale geriet auf den Grund, Sediment deckte sie ein. Als die Entwässerung des Sediments begann, konnte das Wasser in den Luftkammern nicht entweichen. Der Kalkschlamm erreichte nach einiger Zeit ein spezifisches Gewicht, das jenes des eingeschlossenen Wassers erheblich übertraf. Somit kam es zum Auftrieb der Schale. Das Sediment war zu diesem Zeitpunkt noch plastisch genug, um Ausgleichsbewegungen zu erlauben. Diese führten zu den von ROTHPLETZ beschriebenen Verformungen der Schichten in der Nachbarschaft der Ammonitengehäuse. Nach Zerbrechen der Schale und Freiwerden des Wassers bildeten sich Setzungsringe und Spalten in den Lagen, die den Ammoniten umschließen.

Die Masse der decapoden Krebse besteht aus freischwimmenden Formen der hohen See. Selten trifft man grabende Arten, zahlreicher solche, die benthonische Lebensweise bevorzugen. R. FÖRSTER (mdl. Mitt.) stellte bei der Bearbeitung von Solnhofener Krebsen fest, daß sie bereits vor dem Einschwemmen in die Wannen verendet waren oder spätestens beim Eintritt in diese zugrunde gingen. Das Verhältnis Krebse zu Exuvien wird von R. FÖRSTER auf 50:50 geschätzt und neigt mehr zugunsten der Exuvien. Fährten von decapoden Krebsen, an deren Ende das Tier liegt sind lediglich von *Mecochirus* bekannt. Niedere Krebse gehören zu den Seltenheiten.

Als einzige echte, über längere Strecken verfolgbare Fährte, die auch häufiger in Verbindung mit dem verursachenden Tier gefunden wird, gelten die Laufspuren von *Mesolimulus*. Sehr viele, früher als Vertebratenfährten angesehene Eindrücke ließen sich später *Mesolimulus* zuordnen. Fährten von *Mesolimulus* sind meines Wissens die einzigen Zeugnisse für etwas längere Lebensdauer von Tieren, die in Wannen gerieten! Ein Vergleich mit dem rezenten *Limulus*, wohl durchaus vertretbar, läßt auch die Ursache erkennen: Diese Gattung besitzt eine Toleranz-Spanne von etwa 0°—46°C für Wassertemperatur und eine nicht minder große für Salinität (s. SHUSTER jun. 1957, S. 1171 u. f.). Wären auch die rezenten Tiefenangaben übertragbar, dann würden die Tiere Wassertiefen von mehr als 40 m gemieden haben. Die enorme Resistenz ermöglichte den Tieren auch in den übersalzenen, H_2S reichen Bodengewässern der Wannen noch gewisse Zeit zu leben.

Von den Insekten wird angenommen, sie seien auf der feuchten Schwammoberfläche kleben geblieben, als sich das Wasser zurückgezogen hatte. In diesem Fall sollten jedoch des öfteren Spuren eines Todeskampfes angetroffen werden. Dagegen sind die Insekten meist wie auf dem „Spannbrett ausgebreitet" (WALTHER 1904, S. 184) und das umgebende Sediment, das gewöhnlich alle Anzeichen einer Bewegung abbildet, ist ungestört. Die Tiere sind nach unserer Ansicht an der Wasseroberfläche zugrunde gegangen und gelangten erst in den Schlamm,

als sich die Tracheen mit Wasser füllten und die Tiere zu Boden sanken. Versuche mit Fliegen, großen „Schnaken“ und kleinen Käfern, die zufällig in ein wassergefülltes Becken von etwa 2 m Durchmesser und 0,4 m Tiefe gelangten, bestätigen diese Ansicht. Die Insekten trieben nach ihrem Tod noch einige Zeit an der Oberfläche, was offenbar mit der Schnelligkeit der Entleerung der Tracheen und der Größe der Körperoberfläche (glatt oder geborstet) zusammenhängt. Nach spätestens eineinhalb Tagen waren alle beobachteten Formen abgesunken. Sie nahmen am Grund im allgemeinen die Lage ein, die sie beim Tod an der Wasseroberfläche hatten. Bei weit abstehenden Flügeln kam es zu Bauch- oder Rückenlagen, bei angezogenen Flügeln zur Seitenlage. Das Experiment fand in nahezu unbewegtem Süßwasser von etwa 24° C bei einer Tagesaußentemperatur von über 30° C statt. Bei dem Strudelloch eines Insekts, von Walther 1904, S. 203 beschrieben und abgebildet, mag es sich um rein zufälliges Zusammentreffen von einem Insekt und einer Glas-Blase (Shrock 1948, S. 137) handeln. Lediglich bezüglich *Chresmoda* scheint man sich insofern einig, Wals die asserläufer-artigen Tiere im Bereich der Wannen zu leben vermochten. Aber auch von *Chresmoda* sind mir weder Hinweise auf einen Todeskampf bekannt, noch ist die Gattung häufig fossil anzutreffen!

Mit gewissen Ausnahmen sind Echinodermen in den Plattenkalken selten. Gestielte Crinoiden entstammen dem nahen Riffbereich; sie gelangten tot in ihre Einbettungsstelle! Auch die Myriaden von *Saccocoma* waren bereits abgestorben, bevor sie mit ausgebreiteten Armen langsam auf den Grund sanken. Zwar hat Walther 1904, S. 204 eine „Kriechspur“ von *Saccocoma* abgebildet, sie sind aber ohne Bewegung von Seiten des Tieres zustande gekommen: die Arme hielten Fallschirm-artig den Körper vom Aufsetzen am Grund ab, bis die bewegende leichte Strömung nachließ. Unter den Seesternen findet man nur die Ophiurengattung *Geocoma* stellenweise häufig vor. Nach Walther sollen davon Kriechspuren existieren. Auf einer kleinen Platte der Münchener Sammlung, die den Plattenkalken nördlich Neustadt a. Donau entstammt und mindestens zwölf Individuen von Geocoma enthält, zeigt das Sediment keinerlei Bewegungsspuren. Alle Tiere liegen, sich teilweise mit den Armen überdeckend ohne jede Regelung, als seien sie vor Berühren des Sediments abgestorben. Die wenigen bekannten Seeigel zeigen sehr gute Erhaltung, können somit nicht weit und lange transportiert worden sein. Zeichen von Leben haben sie am Grund nicht hinterlassen, sie waren bereits tot, als sie ins Sediment gerieten.

Unter den Wirbeltieren, die wir aus den Solnhofener Plattenkalken kennen, sind die Fische weitaus in der Mehrzahl. Sie sind teils zerfallen und in Einzelteilen überliefert, teils aber ausgezeichnet erhalten. Wir müssen daher verschiedene Einbettungsweisen annehmen. In den meisten Fällen muß Verwesung und eventuelles Auftreiben der Leiche unterbunden gewesen sein. (vgl. dazu Schäfer 1962, S. 63 u. f.). Wo stärkerer Zerfall wirkte, konnten leichte Strömungen Einzelteile zerstreuen. Aasfresser waren sicher nicht am Werk, für sie fehlt jeglicher Nachweis. Aasfresser sind in einem Sediment, das derartig gute Fossilierung ge-

währleistete und Bodenfauna völlig ausschließt, sich somit als lebensfeindlich erweist, nicht anzunehmen.

Man hat oft Eigentümlichkeiten der Einbettung bei *Leptolepis* als Zeugnis für Trockenlegung und Austrocknung herangezogen. Die gleichen Erscheinungen trifft man jedoch auch unter Wasser: die Krümmung der Wirbelsäule, Aufreißen der Bauchhaut, Lockerung der Kopf-Wirbelsäule-Verbindung und, bereits bei leichtester Wasserbewegung, Abreißen des Kopfes mit der vorderen Partie der Wirbelsäule. So gibt es viele Beispiele von Leptolepis aus den Solnhofener Plattenkalken, bei denen Kopf und Schwanz im Sediment kleben bleiben. Durch den Auftrieb riß dann die Wirbelsäule hinter dem Kopf und der Körper konnte mittels Schwoien aus der ursprünglichen Lage bewegt werden. Weiler (1929) wies dieses auch für tertiäre Clupeiden durch Versuche an rezenten Heringen nach. Die übliche Erscheinung ist bei den kleinen, schlanken Solnhofener Fischen nur die Krümmung der Wirbelsäule, das erste Anzeichen des Verwesungsvorganges. Offenbar kam es meist nicht zum Auftrieb.

Reptilleichen sind nicht besonders zahlreich, verglichen mit denen der Fische. Ihre ruhige Einbettungslage setzt Wasserbedeckung voraus! Manche Skelette liegen etwas zerstreut; dies darf wieder der Aktion vom Wasser mit geringfügiger Strömung zugeschrieben werden. Luftatmende Meeresbewohner, wie *Geosaurus*, *Ichthyosaurus* und andere seltene Tiere wurden offenbar als Kadaver eingedriftet. Sowohl Land- wie Luft- und Meeresreptilien hinterließen keinerlei Lebensspuren. Mit Ausnahme einiger zweifelhafter Eindrücke gelang es, fast alle ehedem als Fährten von Reptilien gedeuteten Objekte als Marken zu identifizieren, die unter Wasserbedeckung durch leere Ammonitengehäuse oder Spuren von *Mesolimulus* hervorgerufen wurden (s. a. Seilacher 1963, S. 603/607). Unter Wasser muß auch der von Rothpletz (1909, Taf. 1, Fig. 5, S. 320) untersuchte *Homoeosaurus* abgesetzt worden sein. Sein „Todeskampf“ kann ohne Schwierigkeit eine andere Erklärung finden. Die Homoeosaurier belebten die begrenzenden Landbereiche der Wannen und deren Ufer. Es ist nicht weiter verwunderlich, daß das eine oder andere Individium zugrunde ging und in die ruhigen, fast stehenden Gewässer der „Lagunen“ geriet. Im Gegensatz zu anderen Homoeosaurier-Kadavern steckte der von Rothpletz beschriebene anfangs seitlich und tief im Bodenschlamm. Die Seitenlage des letzten Schwanzdrittels ist noch festzustellen, der Kadaver wurde also nachträglich gedreht. Ursache der Schräglage mag schwache Strömung gewesen sein. Beim Niedersinken bohrten sich der herabhängende Schwanz und die linken Extremitäten des Tieres besonders tief ein und wurden zum Anker, als der Leichnam durch Strömung gekippt und in die engültige Einbettungslage geschwoit wurde. Broili (1925, S. 100) ist ähnlicher Meinung. Er weist ebenfalls darauf hin, daß keinerlei Spuren zu dem Kadaver führen.

Der Zerfall des *Compsognathus*-Skeletts läßt auf Driften, Absinken im Wasser und folgende Strömungsdislokation einzelner Knochen schließen. Die Bauchregion zeigt starke Kalzitblasen-Bildung. Kalzitblasen weisen auf Gasbildung

hin. Der Kadaver haftete derartig fest im Schlamm, daß die Bauchdecke unter Wasser reißen konnte.

Ob für *Archaeopteryx* die von SCHÄFER 1962 erarbeiteten Bedingungen über das Verhalten von Vogelleichen im Wasser zutreffend sind, muß offen bleiben. Es gilt zu bedenken, daß *Archaeopteryx* unter völlig anderen klimatischen und ökologischen Umständen zur Fossilisation kam. Der schwerfällige Körperbau und das heiße Klima haben die Driftdauer sicher beträchtlich verkürzt. Dazu sollte auch den hydrographischen Verhältnissen Beachtung geschenkt werden. Position und Umgebung der *Archaeopteryx*-Funde geben keinen Anlaß zur Annahme von Trockenlegung. Die zerstreute Lage einzelner Skeletteile beim Londoner und beim OPITZ'schen Exemplar erklärt sich durch Strömungsumlagerung.

Wir kommen zu dem Schluß, daß alle Erscheinungen, die bisher als Argumente für die „trockene" Bildung der Solnhofener Plattenkalke dienten, ebensogut oder besser interpretiert werden können, wenn ständige Wasserbedeckung angenommen wird. Ein noch stärkerer Hinweis dafür ist das Fehlen wirklicher Aktivität von Landleben. Wassertiere und deren Reste haben alle bekannten Spuren, Fährten und Marken erzeugt. Hinzu kommt, daß das Sediment ein H_2S-reicher Kalkschlamm war, der sich nur unter Wasser bilden konnte. Die marin sedimentäre Bildung der Solnhofener Plattenkalke scheint uns somit gesichert. Wir haben versucht, diese Ansicht einiger älterer Autoren den modernen Erkenntnissen anzupassen.

B. 5. Entstehung der Plattenkalke

a. Morphologie und Klima

Für das Verständnis der Bildung der Solnhofener Plattenkalke ist die geographische Beschaffenheit ihres Ablagerungsraumes wichtig. Nach der Darstellung von GÜMBEL (1891, S. 287) handelt es sich um ruhige Buchten, die den Bewegungen der offenen See kaum zugänglich waren. Manche der Buchten seien vom Meer abgeschnürt gewesen und ausgesüßt worden, obwohl Süßwasserfauna fehle.

Seither ist die Kenntnis durch zahlreiche Untersuchungen gewachsen. Es ist bekannt, daß das Plattenkalk-Sediment in unregelmäßigen, von Riffen umgebenen Becken abgesetzt wurde. Nach FESEFELDT (1962, S. 7) sollen sie als Wannen bezeichnet werden. Die Wannen besaßen flachen Boden und waren mit der See und auch miteinander verbunden. Schwellen zwischen ihnen zeichnen sich durch reduzierte Sedimentation ab. Der ursprüngliche Wannenrand, also die Stellen wo sich geschichtete Absätze an das tote Riff anlehnen sind nur selten erhalten (FESEFELDT 1962, S. 387). Gegen Ende der Sedimentation war das Relief Riff-Wanne nahezu ausgeglichen und die randlich stark gegliederten Wannen, zumindest in der Umgebung von Solnhofen, zu größeren verschmolzen. Anderenorts (STREIM 1961, S. 41, Abb. 19 u. BAUSCH 1963, S. 13, Abb. 17) scheint die Wannenform kaum veränderlich gewesen zu sein. Die ältesten geschichteten

Sedimente in den Wannen sind, wie FESEFELDT (1962, S. 7) darlegen konnte, noch mit Massenkalkfazies verzahnt. Seit Beginn der Ablagerung plattiger und blättriger Kalke wurden dagegen die Schichten dem toten Riff angelagert. Der durch Plattenkalke ausgeglichene Reliefunterschied beträgt lokal bis zu 100 m (vgl. FESEFELDT, 1962).

Wodurch kam das Riffwachstum plötzlich zum Stillstand, warum der schnelle Fazieswechsel? Klimatische Ursachen waren es sicher nicht, da im Fränkischen Jura, hauptsächlich im Süden, entlang der Donau, das Riffwachstum bis in die Zeit der Mörnsheimer Schichten anhielt. Als zwanglose Erklärung bietet sich die Annahme einer Absenkung des Meeresspiegels durch lokale epirogenetische Bewegungen: das Riffwachstum kam durch Trockenlegung zum Erliegen. Die toten Riffe gliederten das Gebiet in ein System flacher Becken und Buchten, die von den Turbulenzen der hohen See geschützt waren.

Die weiteren Ausführungen erfordern, die klimatischen Umstände jener Zeit in Betracht zu ziehen. Allein das Riffwachstum bestätigt uns bereits die hohen Temperaturen des Meeres an der Südküste der mitteldeutschen Insel. Die zahlreichen „Korallenfische“ unter der Meeresfauna weisen in dieselbe Richtung. Mit der O^{18}-Methode hat ENGST (zit. in F. X. MAYR 1964, S. 62) für die Zeit des „Treuchtlinger Marmors“ (*mutabilis*- und *eudoxus*-Zonen, Mittl. Malm) durch Belemniten-Rostren die Wassertemperatur zu etwa 26°C bestimmen können. Korallenwuchs ist hingegen aus dem „Treuchtlinger Marmor“ sehr spärlich bekannt. Dies ist auf zu niedere Temperatur oder größere Wassertiefe zurückzuführen. Schließt man letzteres für die Zeit des Malm δ aus, dann darf im höheren Malm zugleich mit starkem Einsetzen von Korallen-Wachstum ein weiteres Ansteigen der Wassertemperatur vermutet werden. Für die Landfauna wurden hauptsächlich die Insekten als Zeugen für warmes Klima herangezogen (HANDLIRSCH). Ihre mittlere Flügellänge liegt im Durchschnitt gegenüber den vergleichbaren Faunen anderer Formationen sehr hoch und übertrifft die der rezenten tropischen Insekten. Die Zahl und Mannigfaltigkeit der Reptilien auf dem Land, in der Luft und im Meer mag ebenfalls als Hinweis für Wärme gelten. Die Funde von Landpflanzen in den Plattenkalken deuten außerdem auf ziemliche Trockenheit hin.

B. 5. b Hydrologie und Sedimentologie

Die Kombination der geologischen und klimatischen Faktoren ergibt das Bildungsmilieu der Solnhofener Plattenkalke. Ihre hervorragende Schichtung ist ein Beweis für das Fehlen starker, turbulenter Wasserbewegungen. Die morphologischen Voraussetzungen dazu waren, wie oben erwähnt, durchaus vorhanden. Zufuhr von Kalk und Plankton war durch Verbindung mit der offenen See gewährleistet. Das faulschlammartige Sediment (vgl. S. 62, 63) läßt darauf schließen, daß die Verbindung weniger tief war als die Wannen selbst. Der Effekt von Gezeiten ist am Rhytmus der Ablagerung nicht abzulesen (FESE-

Feldt 1962, S. 38). O. Kuhn (1961) will Wilfahrt'sche „Großgezeiten" in reduziertem Maße gelten lassen. Es ist jedoch kaum zum Trockenfallen von Schichtflächen gekommen, denn Trockenrisse finden sich selten. Überdies trifft man sie meist dort an, wo auch andere Hinweise für flaches, bewegtes Wasser vorliegen. Die Seltenheit von Trockenrissen bedeutet außerdem, daß die Schichten unter Wasserbedeckung zum Absatz kamen. Auf allen Schichtflächen müßten nämlich Schlammsprünge anzutreffen sein, wollte man mit derTrockenlegungshypothese arbeiten. Spiegel-Erhöhungen können durch landwärts gerichteten Wind hervorgerufen werden, Senkungen durch seewärtigen.

Starke Verdunstung in den Wannen erhöhte die Salinität und damit die Wasserdichte. Das schwere Wasser sank nach unten. Da jedoch die Wannen vermutlich tiefer waren als ihre Zufuhrwege, blieb das dichte Wasser am Grund stagnierend stehen. Frischer Meerwasser-Austausch erfolgte nur an der Oberfläche. Kontinuierlich hereingetragenes Plankton ging in den übersalzenen Gewässern der Wannen schnell zugrunde und lieferte (neben der eingeschwemmten Megafauna) genügend organische Substanz. Die niedergesunkenen Leichen zerfielen nur unvollkommen, denn in stagnierenden Becken wird der Sauerstoff durch Verwesungsvorgänge rasch aufgebraucht und es kommt zur Bildung von H_2S. Nur so ist die oft ausgezeichnete Erhaltung vieler Fossilien verständlich.

Das Verhältnis zwischen der beträchtlichen Kalkfällung und der Kalklösung im H_2S-Milieu des Grundes muß so gewesen sein, daß Karbonatüberschuß zustande kommen konnte.

Wäre der Wassernachschub gering bis verschwindend gewesen, hätte es zur Bildung von Evaporiten kommen müssen. Davon sind aber aus den Gebieten mit Plattenkalkfazies niemals Anzeichen bekannt geworden, wenn man nicht die spärlichen Pseudomorphosen nach Salz (?) in Nadelform dazurechnen will. Der Wassernachschub aus der See mußte also entsprechend gewesen sein, um Evaporitentstehung zu verhindern und zugleich die bekannten Faunen einzuschwemmen. Die episodischen Schwankungen des Meeresspiegels, die den Wasseraustausch in den Wannen bewirkten, können verschiedene Ursachen gehabt haben. Neben den erwähnten, windbedingten Wasserbewegungen ist noch an weitere Wirkungen zu denken, die heute nicht mehr nachprüfbar sind.

Merkwürdigerweise finden sich die meisten Fossilien zwischen den Schichtflächen. Sie sind auch nicht selten in den tonigen „Fäulen" anzutreffen, haften aber häufig in der kalkigen Hangendplatte. Über die Dauer der Ablagerung von Fäulen wissen wir nichts. Fesefeldt (1962, S. 38) erwähnt, daß Fäulen seitlich in Flinze übergehen können; daher wird man an die Zeitäquivalenz von Fäule und Flinz denken müssen. Flinze sind manchmal durch einfache Bankungsfugen getrennt, die Unterbrechung der Ablagerungen bedeuten. Manche Flinze oder Fäulen keilen an Schwellen vollständig aus. Diese Fakten scheinen auf differenzierte Sedimentation im Bereich der einzelnen Wannen zu deuten, da in der Parallelisierung ihrer Schichtkomplexe verschiedentlich Schwierigkeiten herrschen (Fesefeldt 1962, S. 14 u. f.).

In der Gegenwart werden Becken mit stagnierenden Gewässern, sowohl aus gemäßigtem als auch tropischem Klima, von Fleming & Revelle, Strøm und Wiens angeführt. Wiens (1960) gibt u. a. Hinweise auf Atolle, deren Lagunen vom offenen Meer nahezu abgeschnitten sind. Strøm und Fleming & Revelle (alle 1939) behandeln die uns interessierenden Becken in Küstenregionen. Zum Teil auf Strøm basierend, bringen Fleming & Revelle eine Übersicht der Verhältnisse in „stagnant basins": Salzgehalt und Temperatur des stagnierenden Wassers sind homogen und daher ohne wesentliche Strömungen, die Temperatur ist abnormal hoch, Sauerstoff fehlt. Es bildet sich hoher Gehalt an Nährsalzen (P, N, Si) und $CaCO_3$-Sättigung tritt ein. Die Sedimente sind feinkörnig, stark reduzierend und $CaCO_3$-haltig; H_2S entsteht und die Schichtung ist laminar. Bodenfauna fehlt, die Zusammensetzung der eingebrachten Fauna ist gemischt, findet sich besonders in einzelnen Lagen angereichert („Knopfete Lagen" = Saccocomen-Schwärme, „Fischles-Flinze" mit zahlreichen *Leptolepis* in den Eichstätter und Solnhofener Bruchrevieren!). Dazu kommt schließlich noch ein gewisser Reichtum an organischen Stoffen.

Stagnation wird unter heißem Klima beträchtlich begünstigt. So schreiben Fleming & Revelle (1939, S. 101): „Within tropical regions, therefore, stagnation becomes easier in all kinds of basins owing to the small, diurnal and yearly variations in temperature. Furthermore, the greater influence upon density of temperature differences at high, as contrasted with low, temperatures will tend to produce, in tropic basins, a more stable density stratification, which will not be easily disturbed by mixing due to wind action. Also, the presence of relatively high temperatures in the bottom muds will increase the rate of oxidation and hence of hydrogen sulphide production."

Für unsere Ansichten über die Entstehung der Solnhofener Plattenkalke ist Strøm's Satz von Bedeutung (1939 [1959] S. 365): „Brackish or salt lakes and lagunes within the tropics almost invariably have foul bottom waters".

Die Verhältnisse rezenter, stagnierender Becken in subtropischen und tropischen Breiten können nicht unbesehen mit den süddeutschen Plattenkalk-Vorkommen verglichen werden. Hier waren Faktoren wirksam, die heute kaum noch zu rekonstruieren sind. Man erhält aber trotz allem in großen Zügen befriedigende Antworten auf viele Fragen, welche die Plattenkalke aufwerfen.

Die Frage der Kalkausscheidung ist sehr wichtig. Wir wollen sie daher anhand neuer Kenntnisse diskutieren. Newell & Rigby (1957) beschäftigen sich (S. 57 u. f.) unter anderem mit den verschiedenen Typen der Kalkausscheidung auf der Great Bahama Bank. Feinstverteiltes $CaCO_3$ kommt meist westlich der Andros-Insel, in deren Windschatten, zur Ablagerung. Küstennahes Flachwasser, erhöhte Salinität und geringe Wasserbewegung begünstigen offenbar diesen Typ der Kalkabscheidung. Das fast stagnierende Wasser unmittelbar an der Küste entwickelt die höchste Salinität während der warmen Jahreszeit und gerade dann erfolgt der bedeutendste Kalkniederschlag. Weitgehende Faunenarmut kennzeichnet das Verbreitungsareal des „calcium carbonate ooze", denn selbst

mäßige Bewegung des Wassers führt zu Trübungen. Bei Drehung des Windes wird der aufgewühlte Schlamm weit in die See hinaus geführt.

Kalk wird dort bevorzugt in Form winziger Aragonitnädelchen ausgefällt (Newell & Rigby 1957, Taf. 16, Fig. 1, S. 59). „Calcium carbonate ooze" setzt sich bis zu 97% aus $CaCO_3$ zusammen und nur, wo der $MgCO_3$-Gehalt etwas ansteigt, sinkt $CaCO_3$ auf etwa 91%. SiO_2, FeO_3, Al_2O_3 liegen mit einer Ausnahme unter 1% (1957, S. 60). Ob die Kalkfällung anorganischer oder biologischer Natur ist, bleibt vorerst ungeklärt. Immerhin konnte Lowenstam (1957, S. 78, Fußnote bei den Diskussionsbemerkungen) beweisen, daß viele der mehr verbreiteten, schwach verkalkten Kalkalgen nach ihrem Absterben in Aragonitnadeln, ähnlich den erwähnten, zerfallen.

Der Unterschied in der Bildungsweise zwischen dem „calcium carbonate ooze", auf der Bahama Bank und den Solnhofener Plattenkalken besteht hauptsächlich darin, daß das Ablagerungsgebiet der Plattenkalke besser vor den Wasserbewegungen der See geschützt war. Die Sedimentation konnte also ziemlich ungestört vor sich gehen; zugleich wurde aber die Durchlüftung des Bodenwassers soweit behindert, daß es zu Stagnation und H_2S-Bildung kommen konnte. Das Wasser scheint in den Plattenkalk-Wannen tiefer gewesen zu sein, da jegliche Zeichen stärkerer Turbulenz im Sediment fehlen (s. a. oben genannte Ausnahmen).

H_2S entwickelt sich im westlichen Küstengebiet der Andros-Insel im Kalkschlamm lediglich dort, wo Mangroven wachsen. Flachwasser-Karbonatschlämme mit H_2S-Gehalt sind aber in der Florida Bay in ausgedehnten Flächen anzutreffen (Ginsburg 1957, S. 88).

Ginsburg (1957, S. 91 u. f.) behandelt eingehend die Karbonat-Diagenese. Proben aus der Florida Bay lieferten dabei das interessante Ergebnis, daß feinkörnige Sedimente, schon wenige cm unter ihrer Oberfläche viel Feuchtigkeit verlieren. In etwa 30 cm Tiefe ist der Wassergehalt von 260% auf nahezu 100% der Trockenmasse zurückgegangen (Diagramm 1957, S. 91), ohne daß von echter Setzung durch Überlagerungsdruck zu sprechen wäre. Der Argonit wandelt sich im allgemeinen erst nach der Frühdiagenese in Kalzit um. Für die Kenntnis der Solnhofener Plattenkalke sind diese Tatsachen wissenswert, da die seltenen Lagen mit Aufarbeitungs-Geröllen dann leicht zu erklären sind.

Für die Einbettung der Fossilien ist der rasche Wasserverlust wenige Zentimeter unter der Oberfläche sehr bedeutend. Große Kadaver sinken tief in den Schlamm; sie erreichen die bereits zäher gewordenen Partien, bleiben besser haften und möglicher Auftrieb wird dadurch behindert. Es ist somit auch verständlich, wie senkrecht im Sediment steckende Ammonitengehäuse in dieser Lage zerbrechen konnten. In diesem Zusammenhang sollten noch die Bemerkungen über den *Homoeosaurus* auf S. 59 betrachtet werden.

B. 5. c. Zusammenfassung der wichtigsten Punkte und Bildungsdauer

1. Tote Riffe begrenzten vielgestaltige Wannen, die zwischen ihnen eingesenkt waren und mit der offenen See in Verbindung standen.

2. Das Wasser in den Wannen war vor den Bewegungen der offenen See geschützt, deshalb herrschte dort ruhige Sedimentation.
3. Das Klima war tropisch.
4. Verbindung mit dem Meer brachte genügend Nachschub an organischen und anorganischen Stoffen.
5. Abgeschlossenheit, geringe Wasserbewegung und tropisches Klima bewirkten Überwärmung, Übersalzung und am Grunde Stagnation mit H_2S-Bildung in den Wannen.
6. Durch aperiodische Wasserspiegel-Schwankungen konnte es einerseits zu Wasserverflachungen und örtlichen Trockenlegungen in den Wannen kommen. Anderseits konnte es aber durch starke Zufuhr von frischem Meerwasser wieder zur Erneuerung der Gewässer in den Wannen kommen.
7. Rezente, feinkörnige Kalkausscheidungen, die unter ähnlichen, tropisch-marinen Bedingungen gebildet werden, können zur Erklärung für eine subaquatische Bildung auch des Plattenkalk-Sediments angeführt werden.

Wir haben somit zahlreiche Gründe, die Solnhofener Plattenkalke als subaquatische Bildungen anzusehen. Die seltenen, offenbar immer kurzfristigen und örtlich begrenzten Trockenlegungen passen gut in dieses Bild. So stimmen wir also im Grundsätzlichen mit der Auffassung GÜMBEL's (1891) und KRUMBECK's (1928) überein (vgl. S. 49), unterscheiden uns aber in der Deutung der Sedimentation und anderer Punkte.

B. ZIEGLER (1961) hat sich anhand neuer Erkenntnisse mit den Solnhofener Verhältnissen beschäftigt. Seinen Ausführungen ist zu entnehmen, daß auch er für kontinuierliche Wasserbedeckung eintritt und nur spärliche Zeichen von Trockenlegung erkennt.

Der Beginn der Plattenkalksedimentation scheint in den verschiedenen „Revieren" heterochron zu sein: Im S zwischen Daiting und Rennertshofen haben sich jedenfalls Plattenkalke auch noch später gebildet (vgl. FESEFELDT 1962).

Die Plattenkalke fassen wir mit den liegenden Röglinger Bankkalken und den hangenden Mörnsheimer Schichten unter den Begriff „Solnhofener Schichten" zusammen. Dem entspricht die vertikale Verbreitung von *Hybonoticeras hybonotum* (OPPEL). Insgesamt veränderte sich die Cephalopodenfauna während dieses Zeitraumes aber bedeutend (FESEFELDT 1962, S. 56/57). Schließen wir die jüngeren Vorkommen im Süden aus, dann darf die Dauer einer Faunenzone für die Entstehung der Plattenkalke gerechnet werden. Ich halte daher die Ablagerung in wenigen Jahren oder Jahrhunderten (vgl. ROTHPLETZ 1909, ABEL 1927 u. a.) für unwahrscheinlich. Veranschlagt man die Dauer des gesamten Malms auf 10 Mill. Jahre, so hätte man bei einer Einteilung in 20 Zonen im Durchschnitt ungefähr 500 000 Jahre pro Zone anzusetzen. Selbst wenn wir in unserem Fall nur die Hälfte dieser Zeit in Betracht ziehen wollten, würde dies der Wahrheit

wesentlich näher kommen, als die bisher gemutmaßten Zahlen. Das lange Gleichbleiben hochmariner Faunen, die Ammoniten ausgenommen, ist nicht weiter verwunderlich. In den bedeutend jüngeren Neuburger Bankkalken treten dieselben Arten von Krebsen und Fischen noch auf, wie in den Solnhofener Plattenkalken obwohl sich die Ammonitenfauna inzwischen völlig verändert hat. Mehrere Zonen zwischen beiden Schichtkomplexen können ausgeschieden werden.

Abschließend darf betont werden, daß die vorliegende Arbeit besonders dazu dienen soll, das Interesse an den Solnhofener Plattenkalken und ihrer Entstehung erneut zu entfachen und die Diskussion mit modernen Gesichtspunkten zu beleben. Sie soll Ausgangspunkt und Anregung zu zahlreichen künftigen Detailuntersuchungen sein.

Schriftenverzeichnis

Abel, O., 1927: Lebensbilder aus der Tierwelt der Vorzeit. — 714 S., 2 Taf., 551 Abb., (G. Fischer) Jena.

Aldinger, H., 1930: Über die Entstehung der Kalkschiefer des oberen weißen Jura von Nusplingen in Württemberg. — Cbl. Mineral. etc. Jg. 1930, B, Stuttgart.

Almela, A. & Rios, J. M., 1947: Explicación al mapa geólogico de la provincia de Lérida. — Inst. Geol. Min. España, 193 S., 23 Taf., 1 geol. Karte, 1 Profiltaf., Madrid.

Bausch, M., 1963: Der Obere Malm an der unteren Altmühl. Nebst einer Studie über das Riff-Problem. — Erlanger Geol. Abh., **49**, 38 S., 6 Taf., 22 Abb., 1 geol. Karte, Erlangen.

Broili, F., 1925: Beobachtungen an der Gattung *Homoeosaurus* H. v. Meyer. — Sitz. Ber. Bayer. Akad. Wissensch., Math.-naturwissenschaftl. Abt., S. 81—121, 9 Taf., 1 Abb., München.

Broili, F., 1932: Der Obere Jura von Montsech (Provinz Lérida) im Vergleich mit den Ob. Jura-Vorkommen von Cerin (Dept. Ain) und von Franken. — Géol. Mediterr. Occident., Géol. Pays Catalanes, **2,** 16, Partie III, 11 S., 2 Taf., Barcelona.

Dacqué, E., 1936: Versteinertes Leben. — 131 S., 48 Taf., 16 Abb., Berlin-Zürich (Atlantis Verl.).

Engst, H., 1961: Über die Isotopenhäufigkeit des Sauerstoffs und die Meerestemperatur im süddeutschen Malm. — Diss. Frankfurt a. M., 184 S. Frankfurt. referiert von F. X. Mayr.

Fahrion, H., 1937: Ein Beitrag zur Entstehung des Nusplinger Kalkschiefer auf Grund neuerer Fossilfunde. — Jber. Mitt. Oberrhein. geol. Ver., N.F. **26**, S. 60—65, Stuttgart.

Fesefeldt, K., 1962: Schichtenfolge und Lagerung des oberen Weißjura zwischen Solnhofen und der Donau (Südliche Frankenalb). — Erlanger Geol. Abh., **46,** 80 S., 1 Taf., 30 Abb., 1 geol. Karte, Erlangen.

Fleming, R. H. & Revelle, R., 1955: Physical processes in the ocean. in: Recent marine sediments. A symposium. Herausgeg. P. D. Trask 1939 und 1955. — S. 48—141, 24 Abb., Tulsa (SEPM).

Fuchs, B., 1937: Geologische Beobachtungen bei Nusplingen und sedimentpetrographische Untersuchungen über die Entstehung der Nusplinger Plattenkalke. — Jber. Oberrhein. geol. Ver., N.F. **26**, S. 51—59, Stuttgart 1937.

Ginsburg, R. N., 1957: Early diagenesis and lithification of shallow-water carbonate sediments in South Florida. in: Regional aspects of carbonate deposition, herausgeg. von R. J. LeBlanc und J. G. Breeding. — Soc. Econ. Paleont. Mineralogists, Special Publication **5,** S. 80—99, 18 Abb., mit Diskussionsbemerkungen im Anhang (S. 99—100), Tulsa.

Gümbel, C. W. v., 1889: Kurze Erläuterungen zu dem Blatte Ingolstadt (No. XV) der geognostischen Karte des Königreichs Bayern. — 34 S., Cassel (Th. Fischer).

GÜMBEL, C. W. v., 1891: Geognostische Beschreibung des Königreiches Bayern. Vierte Abtheilung „Geognostische Beschreibung der Fränkischen Alb (Frankenjura)". — IX und 763 S., zahlr. Abb., 1 geol. Karte, Cassel.

KIESLINGER, A., 1939: Revision der Solnhofener Medusen. — Palaeontol. Z. **21,** S. 287—296, 5 Abb., Berlin.

KOLB, A., 1951: Die erste Meduse mit Schleifspur aus den Solnhofener Schiefern. — Geol. Bl. NO-Bayern, **1,** S. 63—69, 1 Taf., 1 Abb., Erlangen.

KOLB, A., 1961: Die Ammoniten als Dibranchiata. — Geol. Bl. NO-Bayern, **11,** S. 1—26, 2 Taf., 5 Abb., Erlangen.

KRUMBECK, L., 1928: Bemerkungen zur Entstehung der Solnhofener Schichten. — Cbl. Mineral. Geol. etc., Jg. 1928, S. 428—434, Stuttgart.

KUHN, O., 1961: Die Tier- und Pflanzenwelt des Solnhofener Schiefers. — Geologica Bavarica **48,** 68 S., 1 Abb., München.

MAYR, F. X., 1964: Das Karbonatthermometer zur Bestimmung der Tempeartur vorzeitlicher Meere. — Naturw. Rundsch. 1964, **17,** 2, S. 61—63, Stuttgart.

NEWELL, N. D. & RIGBY, J. K., 1957: Geological studies on the Great Bahama Bank. in: Regional aspects of carbonate deposition, herausgeg. von R. J. LEBLANC und J. G. BREEDING. — Soc. Econ. Paleont. Mineralogists, Special Publication **5,** S. 14—72, 22 Taf., 22 Abb. Mit Diskussionsbemerkungen im Anhang (S. 71—79), Tulsa.

RICHTER, R., 1942: Die Einkippungsregel. — Senckenbergiana, **25,** S. 181—206, 1 Abb., Frankfurt (Senckenberg am Meer 131).

ROTHPLETZ, A., 1909: Ueber die Einbettung der Ammoniten in die Solnhofener Schichten. — Abh. K. Bayer. Akad. Wissensch., II Kl., **24,** 2. Abt., S. 313—337, 2 Taf., 1 Abb., München.

SAINT-SEINE, P., 1948: Les poissons des calcaires lithographiques de Cerin (Ain). — Nouv. Arch. Mus. Hist. Nat. Lyon, Fasc. **II,** 357 S., 26 Taf., 128 Abb., Lyon.

SCHÄFER, W., 1962: Aktuo-Paläontologie nach Studien in der Nordsee. — 666 S., 36 Taf., 277 Abb., Frankfurt/M. (W. Kramer).

SCHWERTSCHLAGER, J., 1919: Die lithographischen Plattenkalke des obersten Weißjura in Bayern. — 36 S., 20 Abb., München (Verl. Nat. u. Kultur Dr. F. J. Völker).

SEILACHER, A., 1963: Umlagerung und Rolltransport von Cephalopoden-Gehäusen. — N. Jb. Geol. Paläontol., Monatsh., 1963, 11, S. 593—615, 9 Abb., Stuttgart.

SHROCK, R. R., 1948: Sequence in layered rocks. — 507 S., 397 Abb., New York (McGraw-Hill).

SHUSTER, C. N., Jr., 1957: Xiphosura (with special reference to *Limulus polyphemus*). — Geol. Soc. America, Mem. **67** (vol. 1, Ecology, herausgeg. von J. W. HEDGPETH), S. 1171—1173, New York.

STAFF, H. v. & RECK, H., 1911: Die Lebensweise der Zweischaler des Solnhofener lithographischen Schiefers. — Sitz. Ber. Ges. Naturforschd. Freunde, Berlin, **3,** Jahrgang 1911, S. 157—175, Taf. 6—11, 1 Abb., Berlin.

STREIM, W., 1961: Stratigraphie, Fazies und Lagerungsverhältnisse des Malm bei Dietfurt und Hemau (Südliche Frankenalb). — Erlanger Geol. Abh., **38,** 49 S., 25 Abb., 1 geol. Karte, Erlangen.

STRØM, K. M., 1955: Land-locked waters and the deposition of black muds. in: Recent marine sediments. A symposium. Herausgeg. von P. D. TRASK 1939 und 1955. — S. 356—372, 3 Abb., Tulsa (SEPM).

TEMMLER, H., 1964: Über die Schiefer- und Plattenkalke des Weißen Jura der Schwäbischen Alb (Württemberg). — Arb. Geol.-Paläontol. Inst. TH Stuttgart, N. F. **43,** 106 S., 24 Taf., 18 Abb., 2 Tab., Stuttgart.

WALCOTT, C. D., 1898: Fossil medusae. — Monogr. U.S. Geol. Survey, **30,** 201 S., 47 Taf., 26 Abb., Washington.